

**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA  
DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS**

**ESTRATEGIA DE INSPECCIÓN IMPREDECIBLE PARA  
VERTEDEROS ILEGALES DE RCD BAJO UN ENFOQUE DE JUEGOS  
DE STACKELBERG**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL**

**AUTOR**

**MAXIMILIANO EDUARDO ASTUDILLO ROJAS**

**PROFESOR GUÍA**

**Dr. PABLO ESCALONA RODRÍGUEZ**

**PROFESOR CO-REFERENTE**

**Dra. MÓNICA LÓPEZ CAMPOS**

**VALPARAÍSO, 24 DE OCTUBRE 2025**



## CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

### 1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción):  Memoria o trabajo de título  Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Estrategia de inspección impredecible para vertederos ilegales de RCD bajo un enfoque de juegos de Stackelberg

Nombre del candidato(a): Maximiliano Eduardo Astudillo Rojas

Carrera / Grado: Ingeniería Civil Industrial

Campus: Casa Central Valparaíso Departamento: Departamento de Industrias

### 2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Dr. Pablo Escalona Rodríguez, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

### 3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

6 meses  12 meses  2 años  3 años  5 años  10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):


---

---


---

### 4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 27/10/2025 Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 27/10/2025 Firma: 

*Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.*



## Tabla de Contenidos

<b>1</b>	<b>Agradecimientos</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Resumen</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Abstract</b>	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>Problema de Investigación</b>	<b>7</b>
<b>5</b>	<b>Objetivos</b>	<b>9</b>
5.1	Objetivo General . . . . .	9
5.2	Objetivos Específicos . . . . .	9
<b>6</b>	<b>Marco Teórico</b>	<b>10</b>
6.1	Producción y tratamiento de los residuos sólidos . . . . .	10
6.2	Impacto de los microbasurales y la importancia de su control . . . . .	12
6.3	Regulación y control de microbasurales . . . . .	15
6.4	Antecedentes nacionales . . . . .	17
6.5	Antecedentes específicos en Valparaíso . . . . .	19
6.6	Teoría de Juegos . . . . .	21
6.6.1	Tipos de juegos . . . . .	23
6.6.1.1	Según el momento de decisión . . . . .	23
6.6.1.2	Según el nivel de información disponible . . . . .	23
6.6.2	Equilibrio en juegos dinámicos de información completa . . . . .	24
6.6.3	Modelo de Stackelberg . . . . .	25



6.7	Trabajos relacionados . . . . .	27
<b>7</b>	<b>Formulación del modelo</b>	<b>33</b>
7.1	Formulación de una estrategia de intervención spot para microbasurales . . . . .	33
7.1.1	Problema del seguidor . . . . .	33
7.1.2	Problema del líder . . . . .	34
7.2	Formulación equivalente para inspección impredecible . . . . .	36
7.3	Sobre la implementación práctica de la estrategia de inspección spot . . . . .	40
7.3.1	Enfoque de Monte Carlo . . . . .	40
7.3.2	Enfoque GRASP . . . . .	41
<b>8</b>	<b>Caso de estudio</b>	<b>44</b>
8.1	La estrategia spot marginal para la autoridad . . . . .	45
8.2	La estrategia de inspección impredecible . . . . .	47
8.3	Simulación del plan de implementación . . . . .	50
<b>9</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>54</b>
<b>10</b>	<b>Anexos</b>	<b>57</b>
10.1	Base de datos y caracterización inicial . . . . .	57
10.2	Ajuste de polígonos de cuadras . . . . .	58
10.3	Estimación de demanda de infractores y generación de residuos . . . . .	61
10.3.1	Conteo de permisos por cuadra y año . . . . .	61
10.3.2	Estimación de RCD por permiso, cuadra y año . . . . .	61
10.3.3	Selección del máximo temporal por cuadra . . . . .	62



10.4 Costos de transporte y entrada . . . . . 63

## 1 Agradecimientos

Quisiera agradecer a mis amigos de carrera: Ignacio, Aníbal, Alfredo y Sofía, quienes me han acompañado en cada dificultad desde el primer día en que comenzó este desafío. Su apoyo y compañía los han convertido en personas de gran confianza y estima.

A mis amigos personales, que pese a la distancia han sido parte esencial de lo que soy hoy, les agradezco su constante apoyo y los gratos momentos compartidos.

Extiendo también mi gratitud a todos los profesores que han sido parte de mi formación universitaria y con quienes he tenido la oportunidad de colaborar como ayudante. En especial, agradezco a Pablo, por su confianza, su orientación y por haber sido un excelente tutor y profesor guía.

Gracias a Valentina, por su cariño y por acompañarme en esta última y más reciente etapa. Gracias por alegrar mis días, por tu apoyo incondicional, por ser mi lugar de contención y un pilar fundamental para seguir avanzando juntos.

Finalmente, quiero agradecer profundamente a mi familia, quienes han sido el eje central en mi formación como persona. Gracias por inculcarme los valores y enseñanzas que me han permitido llegar hasta aquí. Un recuerdo especial para mi abuelita Nelly (Q.E.P.D.), y, sobre todo, para mi madre, Claudia, mi mayor ejemplo y fuente de inspiración. Gracias por tu amor, por tus sacrificios y por todo lo que haces cada día para que pueda ser feliz y alcanzar mis metas.

## 2 Resumen

**Resumen** — El vertido ilegal en microbasurales es uno de los principales retos de las ciudades del Sur Global, donde la limitada capacidad de aplicación de la ley y la marginación socioespacial amplifican los riesgos medioambientales y para la salud. Los residuos de construcción y demolición (RCD) constituyen una parte importante del total de residuos y, cuando se eliminan de forma inadecuada, degradan los suelos y las masas de agua, propagan enfermedades y aumentan el riesgo de incendios, lo que afecta de manera desproporcionada a las comunidades de bajos ingresos y deteriora la calidad de vida. Aunque existen multas para disuadir este comportamiento, su efecto disuasorio es paliativo cuando las inspecciones de las autoridades son predecibles y sus recursos operativos son limitados. En este trabajo se aborda el problema del vertido ilegal en microbasurales utilizando un enfoque de juego de Stackelberg, en el que la autoridad (el *líder*) define la distribución espacial de las probabilidades de inspección en la red de microbasurales, y los contratistas (los *seguidores*) eligen el lugar de disposición que minimiza su costo esperado teniendo en cuenta el riesgo de ser inspeccionados. El problema se formula como un problema de programación de optimización lineal single-level. Se deriva una formulación equivalente de los esquemas de inspección impredecibles utilizando generación de columnas, en la que cada esquema de inspección tiene asociada una probabilidad de ser seleccionado. Simulamos la aplicación sistemática del esquema de inspección impredecible para determinar el intervalo de tiempo necesario para que los contratistas depositen sus residuos en los vertederos legales.

**Palabras Clave** — Vertido ilegal, juegos de Stackelberg, esquema de inspección impredecible, estrategia de inspección.

### 3 Abstract

**Resume** — Illegal dumping in micro-dumps is one of the main challenges in Global South cities, where limited enforcement capacity and socio-spatial marginalization amplify environmental and health risks. Construction and demolition waste (CDW) constitutes a major share of total waste and, when improperly disposed, degrades soils and water bodies, spreads disease, and increases fire hazards, disproportionately affecting low-income communities and deteriorating quality of life. Although fines exist to inhibit this behavior, their deterrent effect is palliative when the authority inspections are predictable and its operational resources are limited. In this paper, we address the illegal dumping problem in micro-dumps using a Stackelberg game approach, where the authority (the *leader*) defines the spatial distribution of inspection probabilities on the micro-dumps network, and contractors (the *followers*) choose the disposal site that minimizes their expected cost considering the risk of being inspected. The problem is formulated as a single-level linear programming problem. We derive an equivalent formulation of unpredictable inspection schedule using column generation, where each inspection schedule has associated a probability of being selected. We simulate the systematic implementation of unpredictable inspection schedule to determine the time interval required for contractors to deposit their waste at legal disposal sites.

**Keywords** — Illegal dumping, Stackelberg games, Unpredictable inspection schedule, Inspection strategy

#### 4 Problema de Investigación

La Región de Valparaíso enfrenta un desafío creciente en la gestión de residuos sólidos. La proliferación de microbasurales y sitios de disposición ilegal deteriora la calidad de vida, el entorno urbano y los ecosistemas locales. En 2021, Valparaíso fue la segunda región del país con mayor número de sitios ilegales de disposición final, registrando 603 y una superficie total de 45.84 hectáreas (Ossio y Faúndez, 2021), lo que evidencia la urgencia de fortalecer las acciones de control y fiscalización.

En el ámbito de los residuos domiciliarios, la ciudad de Valparaíso genera en promedio 1.09 kg por persona al día (Instituto Nacional de Estadísticas, 2019), cifra que se sitúa en el umbral recomendado por el Consejo Nacional de Desarrollo Territorial de 1 kg por persona al día (Corporación Ciudades, 2024). A este panorama se suma la problemática de los residuos de construcción y demolición (RCD), que pueden alcanzar hasta el 35 % del total de residuos generados a nivel mundial (Ossio et al., 2020). En la región, se estiman 351 454 m<sup>3</sup> anuales de RCD, equivalentes al 12.8 % del total nacional, donde las comunas de Viña del Mar, Concón, Villa Alemana y Valparaíso concentran los mayores volúmenes, con 49 036, 39 886, 36 450 y 35 599 m<sup>3</sup> respectivamente, sin contar con un sitio de disposición final específico para este tipo de residuos (Ossio y Faúndez, 2021, p. 17).

La situación se ve agravada por la alta densidad de microbasurales: el Gran Valparaíso registra 6.3 sitios por cada 10 000 habitantes, liderando el ranking nacional (Corporación Ciudades, 2022). La heterogeneidad territorial (quebradas, cerros y tramas urbanas densas), junto con capacidades limitadas de fiscalización, complejiza la planificación y ejecución de patrullajes efectivos. Si bien existen sanciones por transportar y descargar residuos en lugares no habilitados, de entre 2 y

100 UTM para quienes encargan el traslado, y entre 2 y 50 UTM para quienes lo ejecutan (Ley N° 20879, 2015), su efecto disuasivo resulta insuficiente cuando la presencia de control es esporádica o predecible.

Es entonces que es necesario preguntarse ¿Cómo influye la localización de unidades de vigilancia en la disuasión de infractores que depositan basura en microbasurales? ¿Cómo afecta la reacción de los infractores a las decisiones estratégicas de las autoridades en términos de desplazamiento hacia áreas no vigiladas? ¿Cómo se puede balancear el costo de operación de las patrullas con la efectividad en la reducción de microbasurales? ¿Cómo se puede inducir incertidumbre en la localización de las patrullas para que los infractores no sepan cómo y dónde actuará la autoridad?

## 5 Objetivos

### 5.1 Objetivo General

Generar una herramienta operacional para inhibir la proliferación de microbasurales en la ciudad de Valparaíso.

### 5.2 Objetivos Específicos

1. Formular un modelo de optimización para la localización y asignación de patrullas de vigilancia que incorpore el comportamiento estratégico de los infractores y permita efectos disuasivos.
2. Definir indicadores de desempeño y analizar la sensibilidad de la efectividad del plan respecto de variables de control (número de patrullas y valor de las multas), con el fin de estimar configuraciones eficientes.
3. Proponer lineamientos para traducir las soluciones del modelo en programas operativos de vigilancia factibles, considerando restricciones y necesidades de la operación diaria.
4. Evaluar políticas de administración temporal de los programas de vigilancia (aleatoriedad en las visitas) y su impacto en la reducción de infracciones y de residuos de construcción y demolición en sitios de disposición ilegal.

## 6 Marco Teórico

### 6.1 Producción y tratamiento de los residuos sólidos

Para caracterizar la magnitud del problema de los microbasurales, se debe entender que la composición de los vertederos legales e ilegales puede ser desagregada con el fin de caracterizar y estimar el impacto de cada uno de sus componentes. A diferencia de la basura, los residuos se definen como aquellos desechos o sustancias que se eliminan y que pueden ser reutilizados al no carecer de valor residual (Arboleda, 2009). En cuanto al valor de los residuos, Arboleda (2009) señala que, a diferencia de la basura, los residuos son potenciales de ser valorizados, donde el problema recae nuevamente en cuando estos se mezclan con otros desechos, haciendo más difícil su tratamiento y reciclaje. Es por esto que se requiere entender que el tratamiento de los residuos engloba una serie de estrategias y políticas públicas enfocadas en la reutilización de estos tras la finalización de su vida útil mediante la gestión de estos, más aún si se considera el gran consumo y producción de residuos que genera la población a nivel mundial de forma creciente año tras año (Bernache, 1998).

En la clasificación de residuos por uso del suelo y origen (Cerrato, 2006), los *Residuos de Construcción y Demolición* (RCD) son entendidos como “aquellos producidos en la construcción de viviendas, oficinas, presas, plantas industriales, escuelas, etc. (madera, piezas metálicas diversas, materiales de embalaje, latas, cajas, alambre, placas metálicas, hormigón y ladrillos)” (ADAPT Chile, 2016). La peligrosidad y composición de los RCD condicionan su tratamiento y potencial de reciclaje, y los distinguen de los *residuos sólidos domiciliarios* (RSD) (también llamados residuos municipales o sólidos urbanos, RSU) definidos normativamente como “residuos sólidos, basuras, desechos o desperdicios generados en viviendas y en establecimientos tales como

edificios habitacionales, locales comerciales, locales de expendio de alimentos, hoteles, establecimientos educacionales y cárceles” (Decreto de Ley N° 189, 2008).

A nivel global, los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) representan aproximadamente el 30 % de los residuos generados (Ginga et al., 2020). Se estima que el 35 % de los RCD a nivel mundial no se trata ni recicla, terminando en vertederos legales e ilegales (Menegaki y Damigos, 2018). En países como México, esta cifra puede alcanzar hasta el 78 % (Mercader-Moyano et al., 2021). La infraestructura insuficiente para el tratamiento de RCD en muchos países conduce a la proliferación de vertederos ilegales y bajas tasas de reciclaje (Rondinel-Oviedo, 2021; Al-Dhaheri y Burhan, 2022).

Respecto al tratamiento de los desechos, existen diversas alternativas y estrategias a nivel nacional para su eliminación o reciclaje con el fin de aprovechar de mejor manera el valor residual de estos. Un *relleno sanitario* es una instalación controlada y diseñada para la disposición final de residuos sólidos domiciliarios, con el fin de minimizar riesgos en la salud de la población y el medio ambiente. A diferencia de este, un *vertedero* corresponde a un lugar de deposición final autorizado pero que no cumple con las medidas sanitarias mínimas, presentando problemas ambientales y sanitarios, mientras que los *basurales* son lugares de disposición de desechos no planificados y sin control sanitario o ambiental (Decreto de Ley N° 189, 2008).

Si bien las alternativas legales de disposición final están presentes en todas las regiones del país, la falta de lugares especializados para cada tipo de desecho es una situación que agrava la masificación de basurales y vertederos ilegales. Según lo estudiado por Ossio y Faúndez (2021), la generación de Residuos de Construcción y Demolición ante la falta de sitios de disposición autorizados en 7 regiones del país produce impactos a nivel social y económico, ayudando en la proliferación de microbasurales con una cifra de casi 3 millones de m<sup>3</sup> de RCD producidos en

Chile cada año.

De acuerdo al Reporte del Estado del Medio Ambiente (2023) el año 2021 se produjeron en Chile 19.6 millones de toneladas de residuos (ver Figura 1), de los cuales el 96.7 % de ellos corresponden a residuos no peligrosos. El 46.1 % del total de residuos producidos durante el mismo año corresponde a residuos no peligrosos municipales alcanzando la cifra de 1 166 942 toneladas adicionales respecto al año anterior. Respecto a la valorización, el reporte indica que solo el 20 % de los residuos no peligrosos fue valorizado, agravando la situación del tratamiento de desechos en los vertederos y permitiendo la proliferación de microbasurales en las zonas aledañas a los centros poblacionales del país.

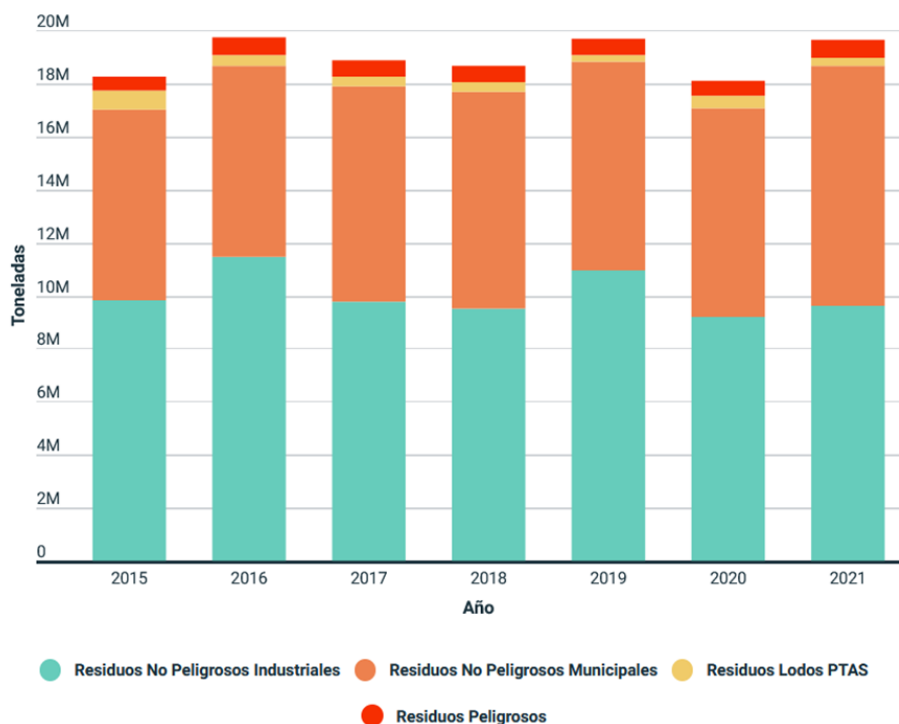


Figura 1: Evolución de la generación de residuos a nivel nacional, por tipo de residuo (2015-2021)

Nota. Extraído de “Reporte del Estado del Medio Ambiente (2023)” (p.1), por SINIA, 2022, Depto. de Información Ambiental.

## 6.2 Impacto de los microbasurales y la importancia de su control

La disposición final ilegal de residuos genera problemas tanto en la planificación como el tratamiento de esta, dando paso a complicaciones medioambientales y de salud de las comunidades cercanas a estos sitios como, por ejemplo, las problemáticas asociadas a la aparición de insectos y roedores que permiten la dispersión de patógenos y enfermedades (Hohl et al., 2023). Respecto a la disposición de residuos sólidos urbanos, además del impacto paisajístico y anímico de su disposición no controlada, según Vivanco (2021), su mala gestión “ha generado costos sociales, económicos y medio ambientales tales como deterioro de la calidad del agua superficial y contaminación de las aguas subterráneas con metales pesados”. Estos sitios también generan significativas pérdidas económicas debido a la degradación del suelo, disminución de valores de propiedad y costos de remediación, así como conflictos comunitarios y malestar social (Liu et al., 2019). Por parte de los Residuos de Construcción y Demolición, según lo estudiado por Molla et al. (2025), las fracciones finas (especialmente cuando contienen yeso) generan lixiviados con altas concentraciones de sulfatos y movilizan metales, con un pulso temprano de contaminación seguido de una aparente estabilización. En ausencia de contención adecuada, estos lixiviados pueden degradar la calidad de aguas subterráneas y favorecer procesos de bioacumulación. Además, la interacción del yeso con materia orgánica puede intensificar la solubilización de metales.

Si bien, los grandes vertederos ilegales han sido identificados por las autoridades nacionales para movilizar los recursos necesarios para su clausura o tratamiento, los microbasurales no cuentan con un plan acorde para el resguardo de las zonas de depósito al tratarse de disposiciones pequeñas y de difícil seguimiento. Un microbasural se entiende como:

Sitios eriazos menores de 1 hectárea, en donde se eliminan o se han dispuesto direc-

tamente sobre el suelo y subsuelo, residuos sólidos de distinta naturaleza, sin tomar los resguardos necesarios para proteger el medio ambiente y la salud de las personas (Decreto de Ley N° 189, 2008).

La aparición de los sitios ilegales de disposición como microbasurales se basa en el hecho de que su existencia es posible ante espacios eriazos existentes y la normalización de la acción o conducta de los infractores. La geografía juega un papel fundamental en esta dinámica, ya que las áreas periféricas de difícil acceso o baja visibilidad a menudo se convierten en vertederos ilegales potenciales (Seror y Portnov, 2018; Oyarce, 2022) (ver Figura 2). En el caso de Valparaíso, la aparición de microbasurales se da gracias a la división plan-cerro de la ciudad, donde las afueras de esta y las quebradas de los cerros, junto a lugares de alta vulnerabilidad social, se convierten en lugares ideales para depositar basura tanto por los propios habitantes de la zona, no habitantes y empresas e instituciones productivas, principalmente asociadas al rubro de la construcción (Oyarce, 2022).

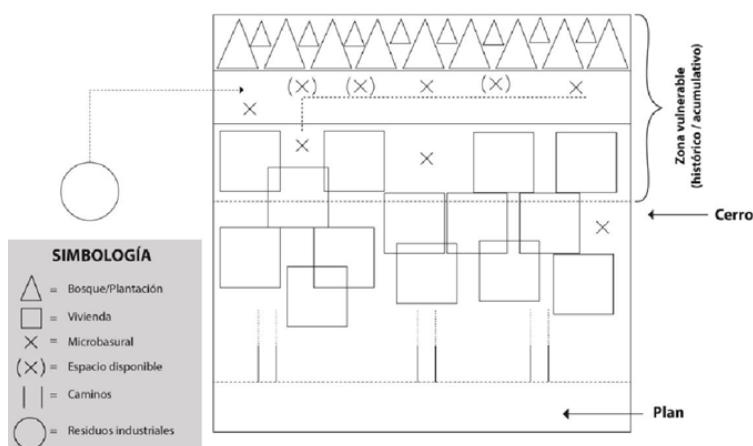


Figura 2: Marco socio-espacial de sitios de disposición ilegal de residuos en la comuna de Valparaíso

*Nota. Extraído de “Microbasurales e incendios forestales en Valparaíso” (p.12), por J. Oyarce, 2022, Manual Técnico N°28.*

Los esfuerzos de las autoridades locales se han centrado en la mitigación y vigilancia de los lugares que han sido identificados como sectores clave, donde mayor es la afluencia de infractores con el fin de proteger estas zonas de la deposición de más desechos no autorizados. Sin embargo, esta estrategia tiene un problema: si se vigila siempre las mismas zonas, los infractores aprenden el patrón de vigilancia de las autoridades, permitiendo que otros lugares disponibles se transformen en microbasurales, o bien, si la frecuencia de inspección no es lo suficientemente alta para que la percepción de riesgo de los infractores sea tal para incentivarlos a dirigirse a los sitios legales (Chen et al., 2019). Por ello, es necesario que el plan de vigilancia y patrullaje de estos sitios, junto a la identificación y clasificación de estos, además de adaptarse a los recursos limitados, sea lo suficientemente impredecible para inducir incertidumbre en los infractores, y a su vez la frecuencia de inspección y las sanciones deben ser lo suficientemente disuasivas para evitar que los infractores depositen sus residuos en los lugares ilegales.

### **6.3 Regulación y control de microbasurales**

Las estrategias más efectivas para combatir la disposición ilegal combinan vigilancia gubernamental, incentivos económicos, participación ciudadana y soluciones tecnológicas. El uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) permite identificar áreas de alto riesgo y detectar vertidos ilegales en tiempo real (Seror y Portnov, 2019). La vigilancia intensiva con imposición de multas significativas y sanciones inmediatas como el incautamiento de vehículos ha demostrado mayor efectividad que multas reducidas o procesos judiciales prolongados (Seror y Portnov, 2019; Liu et al., 2022). Los incentivos y subsidios, junto con tarifas de tratamiento diferenciadas, fomentan el reciclaje pero requieren calibración cuidadosa para evitar efectos contraproducentes (Sun et al., 2022). La participación ciudadana y la concienciación son clave para modificar comportamien-

tos, aunque su impacto depende de la motivación y recursos disponibles (Ramos et al., 2023). Las soluciones tecnológicas como el monitoreo remoto y aplicaciones móviles mejoran la detección y gestión, pero su implementación puede ser costosa y requiere infraestructura adecuada (Cicala et al., 2024).

En el contexto nacional, la Ley N° 20879 (2015), específicamente en el Artículo 192 bis, establece sanciones para quienes realicen el depósito, transporte o traslado de desechos hacia sitios no autorizados, como microbasurales, ya sea en la vía pública, terrenos baldíos, vertederos ilegales o en bienes nacionales de uso público. El marco normativo chileno distingue y sanciona el depósito ilegal de residuos en función del tipo de desecho y la escala de la infracción, lo que requiere una clasificación precisa para aplicar la ley adecuada. Para abordar este problema de manera efectiva, es crucial diferenciar entre las faltas de menor cuantía y las operaciones ilegales a gran escala. Las sanciones varían según el tipo de vehículo utilizado y la peligrosidad de los desechos:

- **Vehículos motorizados:** Multa de 2 a 50 unidades tributarias mensuales, junto con la suspensión de la licencia de conducir e inhabilidad para obtenerla hasta por dos años.
- **Vehículos a tracción animal:** Multa de 0,2 a 1 unidad tributaria mensual, con el retiro del carretón y los aperos. El animal es entregado al conductor.
- **Vehículos no motorizados o manuales:** Multa similar a la de los vehículos a tracción animal y el retiro del vehículo.
- **Desechos tóxicos o peligrosos:** Multa de 20 a 150 unidades tributarias mensuales, presidio menor en grado medio, y suspensión de la licencia de conducir e inhabilidad por hasta dos años.

Las ordenanzas municipales de aseo se erigen como el principal instrumento para regular el ornato y la limpieza a nivel comunal. Estas normas son aplicadas para sancionar la deposición ilegal de residuos de menor volumen, como la "basura de a pie", los desechos domiciliarios fuera de horario, o el abandono de muebles y enseres viejos en la vía pública. Las multas asociadas a estas ordenanzas son generalmente de menor cuantía y son impuestas por los inspectores municipales.

Por otro lado, la Ley N° 20879 (2015) se centra en el combate al transporte y depósito ilegal de residuos de gran volumen, como los Residuos de Construcción y Demolición (RCD), escombros, áridos y otros desechos que requieren de vehículos para su movilización. Esta ley sanciona la operación organizada de vertido en sitios clandestinos, dirigiéndose a toda la cadena de responsabilidad: desde el generador de los residuos hasta el transportista. Las multas de esta ley son significativamente más elevadas, alcanzando hasta 100 UTM para quien encarga el traslado, lo que ejerce un fuerte desincentivo para las operaciones a gran escala.

La fiscalización de estas normativas es una responsabilidad compartida entre diversas autoridades. Mientras que las Municipalidades, a través de sus ordenanzas, fiscalizan el aseo local, Carabineros de Chile posee la facultad de actuar bajo la Ley N° 20879 (2015), retirando de circulación los vehículos que sean sorprendidos en el acto de disposición ilegal de residuos. Esta dualidad normativa subraya la necesidad de una correcta clasificación de la infracción para aplicar la sanción correspondiente.

#### **6.4 Antecedentes nacionales**

En el contexto chileno, el manejo de residuos sólidos presenta una complejidad particular debido a la vasta cantidad de sitios de disposición final distribuidos a lo largo del país. En 2017, la producción de residuos sólidos domiciliarios (RSD) y asimilables superó los 7.4 millones de

toneladas, lo que representa un aumento del 10 % en comparación con el 2012. Este incremento se vincula al crecimiento poblacional y la urbanización, alcanzando una producción per cápita de 1.2 kg/hab/día para la población atendida. El catastro realizado por la Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo (SUBDERE) detalla estos sitios de disposición final, destacando una clasificación entre rellenos sanitarios, vertederos y basurales, cada uno con características y niveles de regulación diferenciados (Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo, 2018, p.13).

A nivel nacional, se identifican 128 sitios activos de disposición de residuos, de los cuales 30 corresponden a rellenos sanitarios, 8 a rellenos manuales, 52 a vertederos y 38 a basurales. Además, existen 56 sitios inactivos o en cierre, y 13 proyectos de nuevas instalaciones en proceso. La mayoría de estos sitios son de administración municipal, aunque algunos son gestionados por privados o bajo una administración mixta, donde el municipio es el propietario, pero la operación se concesiona. Este tipo de distribución de responsabilidad refleja la necesidad de intervenciones estratégicas que combinen control estatal y cooperación privada para abordar la disposición de residuos de manera integral (Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo, 2018).

El Programa Nacional de Residuos Sólidos de la SUBDERE tiene como objetivo implementar sistemas de gestión integral de residuos en el ámbito regional y comunal. Esta estrategia busca mitigar los efectos nocivos de la disposición de residuos, especialmente en áreas no reguladas, y asegurar el cumplimiento de normas sanitarias. En este sentido, la georreferenciación y el catastro detallado de sitios permite no solo una supervisión efectiva, sino también la planificación de inversiones en infraestructura para mejorar la gestión de residuos, con un enfoque de desarrollo territorial sostenible (Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo, 2018).

Respecto al contexto regional, el Relleno Sanitario El Molle, ubicado a 4.6 km del centro de Valparaíso (ver Figura 3), es uno de los sitios de disposición final más importantes de la región,

diseñado para atender al 62.3 % de la población regional, incluyendo las comunas de Valparaíso, Viña del Mar y Quilpué. Propiedad de la Ilustre Municipalidad de Valparaíso, el relleno entró en operaciones el año 2013, cuenta con 35 hectáreas de superficie y posee una vida planificada de 18 años (Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo, 2018).

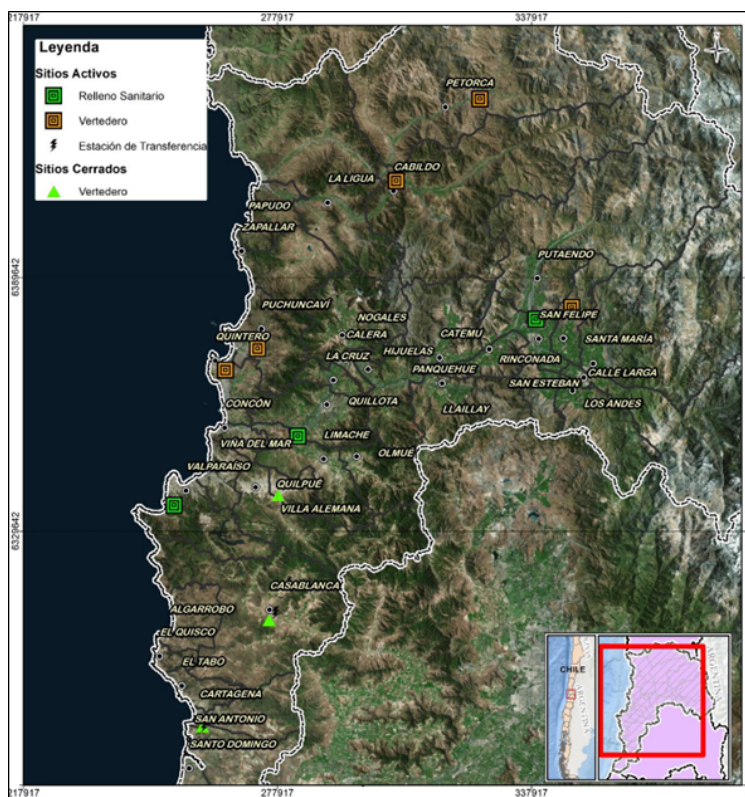


Figura 3: Sitios de Disposición Final de la Región de Valparaíso

*Nota. Extraído de “Diagnóstico por comuna y por región en materia de RSD y asimilables” (p.100), SUBDERE, 2018*

Según lo estudiado por Ossio et al. (2020), los Residuos de Construcción y Demolición corresponden hasta el 35 % de los residuos generados a nivel mundial, y que en Chile ve un desafío mayor ante la falta de fiscalización y la ausencia de trazabilidad de la información. El estudio revela que el 44 % de los municipios encuestados no cuenta con un departamento asociado a la gestión

de RCD, mientras que tan solo el 9.2 % del total cuenta con un registro de las fiscalizaciones, dificultando la obtención de información en materia de fiscalización y gestión de RCD (Ossio et al., 2020).

### **6.5 Antecedentes específicos en Valparaíso**

La región de Valparaíso produce anualmente 351 454 m<sup>3</sup> de RCD, lo que la coloca como la segunda región de Chile que más residuos de este tipo produce. Al igual que los residuos del tipo industrial, los Residuos de Construcción y Demolición contribuyen significativamente a la contaminación de cursos de agua y a la generación de incendios de forma espontánea. Si bien la producción de residuos industriales de la comuna solo alcanza el 2.9 % de la región, el 44 % del total producido proviene de materiales de construcción (Oyarce, 2022). Entre los años 2016 y 2021, la comuna de Valparaíso registró 586 incendios forestales, de los cuales el 11.1 % del total tendrían como causa inicial basura como material combustible (ver Figura 4).

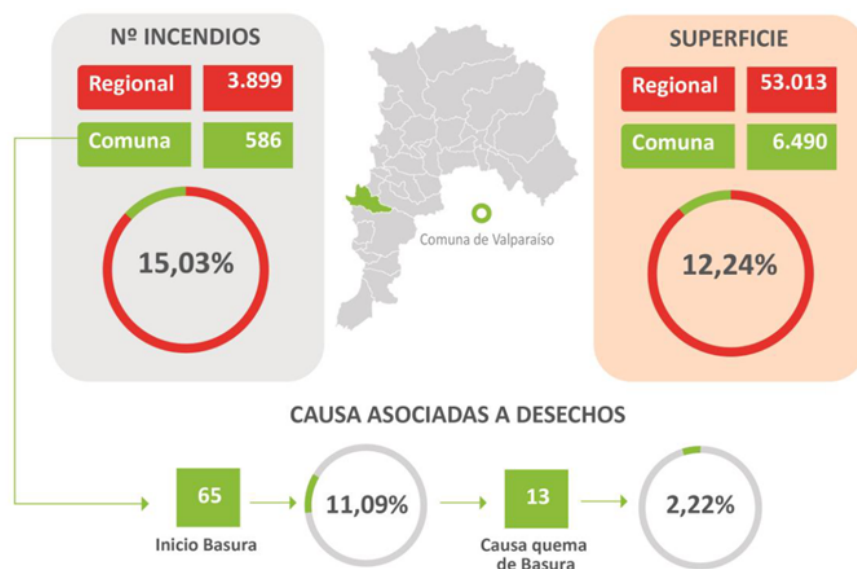


Figura 4: Incendios forestales 2016-2021 en la región de Valparaíso y causas asociadas a basura

*Nota. Extraído de Microbasurales e incendios forestales en Valparaíso (p. 9), por J. Oyarce, 2022, Manual Técnico N°28.*

Con el fin de evitar siniestros de iguales características, la Municipalidad de Valparaíso a través del Departamento de Asistencia Técnica (DAT) está constantemente realizando operativos de retiro de escombros y basura de gran volumen en los cerros y, especialmente, en las quebradas de la ciudad (Ilustre Municipalidad de Valparaíso, 2024). Hay que señalar que los trabajos realizados por la municipalidad en los cerros son de carácter ex-post, es decir, que se realiza el retiro del material desechable una vez que el infractor ha dejado la basura. Algunas otras propuestas van desde el cierre perimetral preventivo en sectores diagnosticados hasta planes de fiscalización a empresas constructoras ya que, según lo estudiado por Oyarce (2022):

Uno de los problemas reconocidos por parte de las investigaciones y análisis de composición de microbasurales en la comuna de Valparaíso son la administración ilegal de desechos de construcción que forman parte del paisaje principal de los vertederos y microbasurales ilegales (2022).

Además, dado que los microbasurales tienen un carácter espontáneo y se encuentran en zonas de difícil acceso y seguimiento, la fiscalización de cada punto crítico identificado en la comuna resulta prácticamente imposible con los recursos limitados disponibles. Esta dificultad, sumada a los 402 km<sup>2</sup> de extensión de la comuna, facilita el desplazamiento de los microbasurales a nuevas áreas. Como señala Oyarce (2022): “la limpieza de un lugar no evita la *habilitación* de otros”. Esto permite concluir que se requiere una estrategia que utilice un enfoque distinto a las respuestas de carácter posterior a la infracción, buscando anticiparse a los infractores usando los recursos de forma óptima.

## 6.6 Teoría de Juegos

La teoría de juegos es una rama de las matemáticas aplicadas que estudia las interacciones estratégicas entre dos o más agentes, donde estos individuos toman decisiones que afectan tanto a sus propios resultados como a los de los demás de forma racional. Según lo señalado por Cerdá et al. (2004) un juego se trata de “tomar las decisiones que más convengan para ganar, teniendo que cumplir las reglas del juego, y sabiendo que los demás jugadores también en los resultados con sus decisiones”.

A partir de lo definido por Gibbons (1992), un juego se representa por un conjunto  $N$  de jugadores, donde  $i = 1, \dots, |N|$  es un jugador arbitrario. El conjunto  $S_i$  corresponde al conjunto de estrategias puras del jugador  $i$ -ésimo, con cada estrategia representada por  $s_i \in S_i$ . Se denota por el vector  $s = (s_1, \dots, s_{|N|})$  a una combinación de estrategias que incluye la estrategia pura de cada jugador  $i \in N$ , conocido como perfil de estrategias puras.

Una alternativa a la definición previa nace cuando un jugador decide aleatorizar su respuesta con el fin de inducir incertidumbre en la decisión del resto de jugadores (sobre todo en los juegos

de información completa), obteniendo así una probabilidad  $\sigma_k(s_i)$ , donde:

$$\sum_{s_i \in S_i} \sigma_k(s_i) = 1 \quad \forall i \in N.$$

Este tipo de estrategias se conocen como estrategias mixtas, donde el conjunto de estrategias mixtas para un jugador  $i$ -ésimo se denota por  $\Sigma_i$ , mientras que el conjunto de posibles perfiles de estrategias mixtas  $\sigma = (\sigma_1, \dots, \sigma_{|N|})$  se denota por  $\Sigma$ . Cada jugador  $i$ -ésimo posee una función de utilidad definida por  $u_i(s) = u_i(s_1, \dots, s_{|N|})$  que responde a partir de la combinación de las estrategias seleccionadas por cada uno de los jugadores. Por último, un juego con las características descritas anteriormente se denota por  $G = \{S_1, \dots, S_{|N|}; u_1, \dots, u_{|N|}\}$ .

Considerando lo anterior, cada variación en alguno de estos elementos da lugar a un juego distinto cuya solución varía significativamente en función de la temporalidad de las decisiones en el juego o, por otro lado, la cantidad de información que poseen los jugadores de cada uno de los participantes.

### 6.6.1. Tipos de juegos

Para categorizar cada uno de los modelos estudiados en teoría de juegos, se consideran diferentes criterios según la naturaleza de las interacciones entre los jugadores, la forma en que los jugadores toman las decisiones en el juego y el tipo o cantidad de información que los jugadores poseen respecto del resto (Cerdá et al., 2004).

En primer lugar, se distingue entre juegos cooperativos y no cooperativos. En los cooperativos, los jugadores pueden llegar a acuerdos vinculantes para coordinar sus decisiones con el fin de maximizar una recompensa conjunta. En los no cooperativos, cada jugador toma sus decisiones

de manera individual sin acuerdos previos (Cerdá et al., 2004).

Dentro de los juegos no cooperativos, se pueden establecer dos clasificaciones adicionales:

#### **6.6.1.1. Según el momento de decisión :**

- **Juegos estáticos:** Los jugadores toman sus decisiones simultáneamente, sin conocer lo que han elegido los demás. Por lo tanto, los jugadores no pueden utilizar a su favor las jugadas del resto de jugadores en su propio movimiento con tal de maximizar su beneficio (Cerdá et al., 2004).
- **Juegos dinámicos:** A diferencia del anterior, un jugador puede conocer algunas decisiones previas antes de elegir su estrategia. Se conoce como líder a aquel jugador que toma la primera decisión, pues al saber que el resto de los jugadores integrarán su movimiento en sus correspondientes decisiones, este puede modificar su propia respuesta con tal de maximizar su beneficio (Cerdá et al., 2004).

#### **6.6.1.2. Según el nivel de información disponible :**

- **Juegos con información completa:** Todos los jugadores conocen las consecuencias de sus decisiones para sí mismos y para los demás. Además, se conocen las funciones de beneficio de cada uno de los jugadores (Cerdá et al., 2004).
- **Juegos con información incompleta:** Alguno de los jugadores desconoce ciertas consecuencias de las decisiones tomadas o la forma en la que opera el juego en sí (Cerdá et al., 2004).

Esta clasificación permite analizar distintos escenarios estratégicos y predecir el comportamiento de los jugadores en situaciones de conflicto o cooperación.

### 6.6.2. Equilibrio en juegos dinámicos de información completa

En los juegos de información completa, cada uno de los jugadores conoce la función de beneficio o pago de todos los participantes. A partir de esta información, cada jugador racional selecciona una estrategia con el fin de maximizar su beneficio, considerando cómo reaccionarán los demás jugadores ante su decisión.

El concepto central para analizar estos juegos es el equilibrio, el cual describe una situación en la que ningún jugador tiene incentivos para desviarse unilateralmente de su estrategia óptima, dado que los demás jugadores también están actuando de manera racional.

La dimensión temporal en los juegos dinámicos permite añadir una nueva capa de complejidad al diseño del juego en cuestión donde, en el caso más sencillo, el jugador que realiza primero su jugada se conoce como líder (*leader*) mientras que aquel que reacciona conociendo la respuesta del líder se conoce como seguidor (*follower*). Dada la estrategia seleccionada por el líder  $s_l^*$ , el seguidor busca maximizar su beneficio a partir de la información que conoce, obteniendo como respuesta:

$$\text{BR}_f(s_l^*) = s_f^* = \arg \max_{s_f \in S_f} u_f(s_l^*, s_f).$$

Luego, la mejor respuesta del seguidor es una función dependiente de la jugada  $s_l$  del líder, por lo que el problema de optimización general del líder debe integrar:

$$\max_{s_l \in S_l} u_l(s_l, \text{BR}_f(s_l)).$$

El equilibrio de este tipo de juegos se conoce como Equilibrio de Stackelberg, y se utiliza para modelar situaciones de discordancia y cooperación en una amplia variedad de campos, desde

la economía y la política hasta la biología y la ciberseguridad gracias a su dinamismo y capacidad de adaptación a varias situaciones a partir de un mismo modelo.

### 6.6.3. Modelo de Stackelberg

Dentro de la teoría de juegos, el juego de Stackelberg es un modelo que describe una situación en la que dos jugadores interactúan de manera secuencial con el fin de obtener el mejor resultado para su beneficio. Este modelo se caracteriza por la existencia de un líder que realiza el primer movimiento, y el seguidor realiza su movimiento posteriormente. Una de las principales características subyacentes del juego de Stackelberg es que tanto el líder como el seguidor pueden, antes de realizar su movimiento, considerar la decisión óptima del otro con el fin de maximizar su propio beneficio. Ello implica que, mientras que uno de los jugadores posee información limitada (asimétrica) de su competencia, el otro es capaz de inferir o prever la respuesta del contrincante modificando su propio movimiento bajo el juego secuencial, asumiendo que el adversario toma una decisión racional respecto a sus alternativas.

Un modelo de optimización bajo un enfoque de juego de Stackelberg se puede describir como un problema de optimización binivel debido a la estructura jerárquica de la toma de decisiones. Dentro de los elementos importantes de un problema de Stackelberg están:

**Nivel superior:** Representa el problema del líder. Su objetivo es maximizar (o minimizar) una función objetivo que depende de las decisiones tanto del líder como del seguidor.

**Nivel inferior:** Representa el problema del seguidor. Su objetivo es maximizar (o minimizar) su propia función objetivo, tomando como dada la decisión del líder.

**Restricciones:** Ambos niveles tienen sus propias restricciones, que pueden ser de igualdad o desigualdad, en función de las características de la situación descrita.

El modelo general de programación matemática de un juego de Stackelberg bajo estrategia pura se puede escribir como:

$$\begin{aligned} \min_x \quad & F(x, y^*(x)) \\ \text{s.t.} \quad & G(x, y^*(x)) \leq 0 \end{aligned}$$

donde  $y^*(x)$  resuelve:

$$\begin{aligned} \min_y \quad & f(x, y) \\ \text{s.t.} \quad & g(x, y) \leq 0, \end{aligned}$$

donde:

- $F(x, y^*(x))$  es la función objetivo del líder, cuya variable decidora es  $x$ , mientras que  $y^*(x)$  es la decisión óptima del seguidor considerando la decisión  $x$  del líder.
- $f(x, y)$  es la función objetivo del seguidor, tomada a partir de su variable decisora  $y$  y la cual dependerá del movimiento  $x$  del líder.
- $G(x, y^*(x))$  y  $g(x, y)$  son restricciones asociadas a la decisión del líder y el seguidor, respectivamente.

Cuando en un juego la recompensa de uno de los jugadores es igual a la pérdida del adversario, se le conoce como juego de suma cero. Estos juegos se caracterizan por modelar la función objetivo del líder y seguidor como una relación de oposición directa, donde las ganancias de uno son las pérdidas del otro. Tras realizarse todas las jugadas en cada turno, si el seguidor no puede realizar una jugada que mejore su objetivo dada la decisión fija del líder, entonces nos encontramos frente a un equilibrio de Stackelberg. A diferencia de un equilibrio de Nash, las características

secuenciales del juego le dan una ventaja estratégica al líder al ser el primero que realiza su movimiento. La importancia de ello en el problema de localización de patrullas radica en que, al considerar las reacciones del seguidor (infractores) ante las decisiones del líder (autoridad), se puede inducir el comportamiento deseado en los infractores, optimizando así la ubicación de las patrullas.

Una variación del juego de Stackelberg clásico es la aplicación para juegos de seguridad (Stackelberg Security Games, SSG). En estos, el líder localiza recursos de revisión y seguridad con el fin de prevenir que ciertos objetivos sean atacados por los seguidores. La función del líder es optimizar una cierta recompensa a partir de una serie de restricciones y variables asociadas al uso de recursos y la protección óptima de los objetivos, respectivamente (Chicoisne et al., 2023).

## 6.7 Trabajos relacionados

La literatura que aborda la problemática de la gestión y disposición de RCD mediante el uso de teoría de juegos puede clasificarse en dos enfoques estratégicos complementarios pero distintos. El primero se centra en el *diseño y la operación eficiente de redes de reciclaje y valorización*, utilizando juegos de Stackelberg para modelar decisiones de diseño, como localización de instalaciones e inversión en capacidad, y de operación, como la implementación de políticas de precios, subsidios y la asignación de flujos de residuos. La premisa subyacente es que una red formal bien diseñada y económicamente incentivada inhibe indirectamente la disposición ilegal al desviar los flujos de Residuos de Construcción y Demolición hacia los sitios de acopio y disposición autorizados. El segundo enfoque aborda el problema de manera más directa mediante el diseño de *estrategias de fiscalización y disuasión* para desincentivar explícitamente a los infractores a disponer residuos en sitios no autorizados. Esta línea emplea juegos evolutivos y de Stackelberg para

modelar la interacción estratégica entre la autoridad y los generadores de residuos, determinando la asignación de patrullas de inspección, recursos de vigilancia y políticas de multas para maximizar el cumplimiento. Si bien el primer enfoque provee la infraestructura de base, esta revisión se enfocará predominantemente en el segundo, explorando cómo la teoría de juegos, en particular los juegos de seguridad de Stackelberg, se aplica al diseño de estrategias de inspección y vigilancia que inhiben la formación y proliferación de microbasurales.

Han et al. (2022) diseña una política de precios para una cadena de suministro de material de construcción nuevo y remanufacturado, integrando el efecto de los subsidios gubernamentales, la descentralización de la cadena de suministro y las preferencias de los consumidores por productos amigables con el medioambiente. El fabricante (líder) define la inversión en mejorar el desempeño ambiental del producto (grado *verde*) y los precios mayoristas de bienes nuevos y remanufacturados, mientras que el minorista (seguidor) fija los precios de venta de ambos, maximizando beneficios en un juego de Stackelberg. Los autores derivan de forma analítica el equilibrio de Stackelberg mediante condiciones de primer orden y lo validan a través de simulaciones numéricas con parámetros provenientes de trabajos relacionados y encuestas del sector de remanufactura de RCD en China.

Yao et al. (2022) aborda el diseño de la red de disposición de RCD como un juego de Stackelberg bi-level entre gobierno (líder) y contratistas (seguidores). El líder determina qué instalaciones de disposición abrir y de qué tipo en ubicaciones candidatas (y su presupuesto asociado) para minimizar el costo del sistema (inversión, tratamiento y transporte), mientras que los contratistas asignan sus flujos de RCD a las instalaciones disponibles minimizando sus costos de transporte y disposición. El modelo es formulado como un single-level MIP y se resuelve con un solver comercial. La validación se realiza con casos reales en Hong Kong mediante la generación de un conjunto

de sitios de obras y la selección de sitios candidatos según la información disponible de utilización de suelo de la ciudad, usando distancias reales y un esquema de cobros por tipo de instalación.

Wang y Yi (2023) aborda el diseño de una red de recolección de contratistas-centros de acopio-sitios de disposición final (three-echelon) de RCD mediante un juego de Stackelberg bi-level: en este juego el gobierno (líder) determina ubicaciones de acopio, asigna el número de camiones define a qué instalación final envía cada punto de acopio minimizando el costo social de transporte. Las pequeñas obras (seguidores) eligen el punto de acopio al que entregar para minimizar su costo de transporte. El modelo se formula como un single-level MIP resolviéndose con un solver comercial. La evaluación considera un conjunto generado de sitios de construcción y ubicaciones candidatas en Hong Kong, combinado con instalaciones de disposición final reales.

Liu et al. (2023) diseña un esquema de compensación en proyectos de asociación público-privada (PPP) para el reciclaje de RCD durante la etapa de operación, considerando conjuntamente las fases de reciclaje y remanufactura. El gobierno (líder) define un plan de compensación mediante coeficientes monetarios de pago por resultado, ligados al desempeño observado en ambas etapas, y un componente que remunera la inversión tecnológica ambiental (grado *verde*) de los productos, buscando maximizar el bienestar social. El socio privado (seguidor) decide si acepta dicho plan y, en ese caso, fija sus niveles de inversión en reciclaje y remanufactura, así como el nivel *verde* de los productos remanufacturados, maximizando sus beneficios. El modelo combina teoría principal-agente con un juego de Stackelberg, y el equilibrio se obtiene analíticamente mediante condiciones de primer orden. La validación se realiza con simulaciones numéricas paramétricas utilizando valores de estudios relacionados.

Zhang et al. (2024) diseña una política de precios para una cadena de suministro de reciclaje de RCD que integra el efecto conjunto de la aversión al riesgo de los consumidores y un

impuesto al carbono sobre las decisiones de precios y beneficios. El fabricante (líder) define precios y esfuerzos ambientales, mientras que el remanufacturador (seguidor) responde fijando sus precios y cantidades, ambos maximizando beneficios en un juego de Stackelberg. Los autores derivan analíticamente el equilibrio de Stackelberg mediante inducción hacia atrás y lo validan a través de simulaciones numéricas que exploran distintos escenarios de impuestos y grados de averción al riesgo, utilizando parámetros sugeridos por expertos y valores obtenidos en la literatura relacionada.

Los modelos de Stackelberg anteriores abordan el diseño óptimo de la cadena formal de valor y disposición de los RCD. Sin embargo, la efectividad de estas redes se ve comprometida por la persistencia de la disposición ilegal, una externalidad negativa donde los generadores, buscando minimizar sus costos, evaden el sistema formal. Para modelar esta interacción estratégica entre evasores y autoridad, la literatura ha recurrido predominantemente a un enfoque diferente: la teoría de juegos evolutivos.

Los juegos evolutivos aplicados al diseño de estrategias contra la proliferación de microbasurales se han erigido como una herramienta importante para modelar la interacción entre la autoridad regulatoria y los generadores de residuos. Estos modelos capturan la dinámica adaptativa donde ambos actores, con objetivos contrapuestos (maximizar el bienestar social versus minimizar costos de disposición) ajustan sus comportamientos en función de las decisiones del otro, permitiendo identificar estrategias de control efectivas a largo plazo.

De forma concreta, Chen et al. (2019) desarrolla un modelo de juego evolutivo para el diseño de políticas contra el vertido ilegal. En él, el gobierno determina la probabilidad de supervisión para maximizar su beneficio, el cual considera el daño social evitado, los costos de fiscalización y los ingresos por multas. Los contratistas, por su parte, determinan la probabilidad de vertir legal

o ilegalmente con el objetivo de minimizar sus costos, considerando el ahorro de la disposición ilegal contra el riesgo de ser sancionados. El modelo también explora el rol de la participación ciudadana, modelada como una probabilidad exógena de denuncia que incrementa el costo esperado de la disposición ilegal. El equilibrio del sistema se obtiene mediante el análisis de la dinámica de estrategias evolutivas hasta alcanzar un estado estable. Los autores aplican el modelo para determinar combinaciones óptimas de instrumentos, demostrando con un caso de estudio en Shanghai que el éxito de la política no depende únicamente de la magnitud de la multa. La principal conclusión subraya que incrementar el valor de las sanciones es una medida inefectiva si no se acompaña de un nivel de supervisión suficiente: es la probabilidad de ser detectado y sancionado (multa esperada) lo que realmente disuade el comportamiento ilegal, y no la sola severidad del castigo.

Liu et al. (2022) formula un juego evolutivo en red (tipo *small-world*) para diseñar una estrategia eficiente de supervisión del vertido ilegal de RCD. En el modelo, los contratistas determinan la probabilidad de verter ilegalmente maximizando su beneficio esperado, mientras que el gobierno determina la probabilidad de supervisión buscando minimizar el vertido ilegal sujeto a los costos de fiscalización. Las estrategias evolucionan por imitación en la red hasta alcanzar estados estables. Los autores emplean simulaciones basadas en ecuaciones replicadoras, utilizando parámetros reportados en la literatura y asociados al tratamiento de RCD en Shanghái.

Barakat y Srour (2024) diseñan un modelo de juego evolutivo para optimizar la gestión de políticas de supervisión de vertederos ilegales de RCD. En este juego, el gobierno busca maximizar su beneficio neto (multas menos costos de operación) determinando la probabilidad de supervisión híbrida (cámaras en *hot-spots* y patrullas) o supervisión de solo patrullas. Simultáneamente, los contratistas minimizan sus costos determinando la proporción de su población que elige verter ilegalmente, considerando los costos de disposición y la multa enfrentada. El equilibrio del sistema

se obtiene mediante el análisis de estabilidad de estrategias evolutivas (ESS). El modelo se aplica a dos casos de diferente magnitud (Beirut, Líbano y Kluang, Malasia), demostrando que la estrategia óptima depende del contexto: en áreas extensas, una supervisión híbrida parcial suele ser la política más eficiente para garantizar el cumplimiento a largo plazo.

En síntesis, los juegos evolutivos han sido el instrumento analítico predominante para modelar la emergencia y persistencia del vertido ilegal, capturando la dinámica adaptativa de las poblaciones de contratistas y la respuesta reactiva de la autoridad. No obstante, este enfoque tiene una limitación inherente para el diseño de políticas: al modelar la evolución de estrategias mixtas (probabilidades) en una población, no permite a la autoridad optimizar estratégicamente la asignación de recursos de vigilancia (patrullas, cámaras) y el nivel de multas anticipando la respuesta racional individual de cada generador de residuos. Esta brecha entre el modelado del fenómeno y el diseño óptimo de su solución, donde la autoridad actúa como líder que impone reglas que los generadores, como seguidores racionales, luego sopesan, no ha sido explorada en la literatura. Por lo tanto, se identifica la necesidad de un modelo que formalice esta jerarquía de decisiones, permitiendo transformar los hallazgos de los juegos evolutivos en instrumentos de política concretos y directamente aplicables.

## 7 Formulación del modelo

### 7.1 Formulación de una estrategia de intervención spot para microbasurales

Considere una ciudad con un conjunto de  $I$  ( $i = 1, \dots, |I|$ ) de cuadras con contratistas que generan RCD. Sea  $J$  el conjunto de sitios ilegales de deposición de residuos ( $j = 1, \dots, |J|$ ), mientras que el conjunto de lugares de depósitos legales señalados por la autoridad se denota por  $J_0$ , donde  $J \cap J_0 = \emptyset$ .

La autoridad posee  $n$  equipos de vigilancia que puede desplegar en cualquiera de los  $j$  sitios ilegales, donde  $n < |J|$ . Sea  $q_i$  la cantidad de residuos generada en la cuadra  $i \in I$ , cuyo destino depende de la decisión de los contratistas respecto a qué lugar  $j$  acudir a depositarlos, y sea  $d_i$  el número de contratistas en la cuadra  $i \in I$ .

#### 7.1.1. Problema del seguidor

Los contratistas que disponen ilegalmente de residuos se modelan como agentes racionales, cuya decisión consiste en seleccionar la alternativa que minimiza su costo esperado. Sea  $C_{ij}$  el costo de transporte en que incurren los contratistas la cuadra  $i$  al elegir por el sitio  $j$ . La multa aplicable se representa como  $F$ . Asimismo,  $B_{ij}$  corresponde al costo de transporte y acceso al vertedero autorizado  $j \in J_0$  para cualquier cuadra  $i \in I$ . En términos relativos, se asume que la multa es sustancialmente mayor al costo de disposición legal, y este último, a su vez, superior al costo de transporte hacia un microbasural, i.e.,  $F \gg B_{ij} \geq C_{ij}$ .

Sea la variable de decisión  $W_{ij}$  igual a 1 si los contratistas de la cuadra  $i$  deciden ir al sitio  $j$  a dejar sus residuos, 0 en otro caso. Sea la variable aleatoria  $\mu_i$  el costo incurrido por los contratistas de  $i$ , dado por:

$$\mu_i = \sum_{j \in J} (C_{ij} + F\mathbb{1}_j) W_{ij} + \sum_{j \in J_0} B_{ij} W_{ij}, \quad (1)$$

donde  $\mathbb{1}_j$  es una función indicatriz igual a 1 si la autoridad decide asignar un equipo en el sitio  $j$ , 0 en caso contrario. Sea  $U_i$  el costo esperado de los contratistas de  $i$ , es decir:

$$U_i(\mathbb{P}_j) = \mathbb{E}(\mu_i) = \sum_{j \in J} (C_{ij} + F\mathbb{P}_j) W_{ij} + \sum_{j \in J_0} B_{ij} W_{ij}, \quad (2)$$

donde  $\mathbb{P}_j = \mathbb{E}(\mathbb{1}_j)$  es la probabilidad de que la autoridad asigne un equipo en el sitio  $j$ . Por lo tanto, el problema de optimización de los contratistas de la cuadra  $i$  viene dado por:

$$\text{FP}_i(\mathbb{P}) : \min_{\mathbf{W}_i} \sum_{j \in J} (C_{ij} + F\mathbb{P}_j) W_{ij} + \sum_{j \in J_0} B_{ij} W_{ij} \quad (3)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j \in J \cup J_0} W_{ij} = 1 \quad (4)$$

$$W_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall j \in J \cup J_0. \quad (5)$$

De la formulación anterior, la restricción (4) limita a que los contratistas de  $i$  solo puedan escoger un lugar  $j$  para llevar sus residuos, ya sea este un sitio ilegal o autorizado para su disposición legal.

### 7.1.2. Problema del líder

La autoridad dispone de  $n$  equipos para desplegar en los lugares de intervención. Así:

$$\sum_{j \in J} \mathbb{1}_j \leq n, \quad (6)$$

porque la autoridad no puede desplegar más de  $n$  equipos simultáneamente.

La función objetivo de la autoridad es maximizar el costo esperado de los contratistas con tal de que los incentive a ir al depósito autorizado. Por lo tanto, el problema del líder bajo un enfoque de juego de Stackelberg se define como:

$$\text{MGLP} : \max_{\mathbb{P}, \mathbf{U}} \sum_{i \in I} d_i U_i \quad (7)$$

$$\text{s.t.} \sum_{j \in J} \mathbb{P}_j \leq n \quad (8)$$

$$U_i \leq B_{ij} \quad \forall j \in J_0, \forall i \in I \quad (9)$$

$$U_i \leq C_{ij} + F\mathbb{P}_j \quad \forall j \in J, \forall i \in I \quad (10)$$

$$\mathbb{P}_j \in [0, 1] \quad \forall j \in J \quad (11)$$

$$U_i \geq 0 \quad \forall i \in I. \quad (12)$$

Las restricciones (9) y (10) representan la reacción óptima de los contratistas a la decisión de la autoridad porque  $U_i = \min \{ \min_{j \in J_0} \{ B_{ij} \}, \min_{j \in J} \{ C_{ij} + F\mathbb{P}_j \} \}$  para cualquier  $i \in I$ .

Para monitorear el avance de la política de control de microbasurales ilegales, proponemos dos indicadores:  $I_j^N$  mide la proporción del total de contratistas que han depositado basura en el sitio ilegal  $j$ , e  $I_j^W$  mide la proporción de residuos que se han depositado en dicho el sitio ilegal  $j$  respecto del total. Entonces:

$$I_j^N = \frac{\sum_{i \in I: U_i < \min_{j \in J_0} \{ B_{ij} \}} d_i}{\sum_{i \in I} d_i} \quad \forall j \in J \quad (13)$$

$$I_j^W = \frac{\sum_{i \in I: U_i < \min_{j \in J_0} \{ B_{ij} \}} q_i}{\sum_{i \in I} q_i} \quad \forall j \in J, \quad (14)$$

De esta forma, el indicador agregado de Eliminación Efectiva (*Effective Elimination*, EE) se define como:

$$EE = 1 - \sum_{j \in J} I_j^N, \quad (15)$$

lo que permite evaluar la fracción total de contratistas que han sido efectivamente desviados hacia los sitios autorizados. Por otro lado, el indicador agregado de Reducción de residuos (*Waste Reduction*, WR) se define como:

$$WR = 1 - \sum_{j \in J} I_j^W, \quad (16)$$

lo que permite evaluar la fracción del total de residuos que han sido desviados a los sitios autorizados.

## 7.2 Formulación equivalente para inspección impredecible

En esta sección se presenta una formulación de inspección impredecible equivalente a MGLP. Asumiendo, por ahora, que la autoridad conoce todo el conjunto de esquemas de inspección con  $n$  equipos para el total de sitios ilegales  $j \in J$ .

Sea  $S$  el conjunto de esquemas de inspección. Cada esquema  $s$  de inspección define los  $n$  sitios de deposición ilegal donde la autoridad ubica sus equipos simultáneamente en la ventana de tiempo  $\Pi$ . Bajo un enfoque de juego de Stackelberg, un esquema de inspección impredecible considera también la probabilidad de ser seleccionado. Sea  $\pi_s \in [0, 1]$  la probabilidad de seleccionar el esquema de inspección  $s \in S$ . En la práctica, esta probabilidad se interpreta como la frecuencia con la que se selecciona cada uno de los esquemas para un período de tiempo dado.

La probabilidad de que el sitio  $j$  sea controlado por un equipo en la ventana de tiempo  $\Pi$  se puede expresar como una combinación convexa de los sitios asignados por los esquemas  $s$ . Sea

$\mathbb{P}_j = \sum_{s \in S} \pi_s Y_{j|s}$ , con  $\sum_{s \in S} \pi_s = 1$ , donde  $Y_{j|s}$  es igual a 1 si se asigna un equipo en la ubicación  $j$  en el esquema de inspección  $s$ , 0 en otro caso.

$$\text{MGLP - US : } \max_{\pi, U} \sum_{i \in I} d_i U_i \quad (17)$$

$$\text{s.t. } U_i \leq B_{ij} \quad \forall j \in J_0, \forall i \in I \quad (18)$$

$$U_i \leq C_{ij} + F \sum_{s \in S} \pi_s Y_{j|s} \quad \forall j \in J, \forall i \in I \quad (19)$$

$$\sum_{s \in S} \pi_s = 1 \quad (20)$$

$$\pi_s \geq 0 \quad \forall s \in S \quad (21)$$

$$U_i \geq 0 \quad \forall i \in I, \quad (22)$$

donde cada esquema de inspección  $s$  satisface  $\sum_{j \in J} Y_{j|s} \leq n$ , i.e., el número de sitios en los que la autoridad puede desplegar sus equipos simultáneamente durante  $\Pi$  está limitado por el número de equipos disponibles. La formulación MGLP-US presenta un número exponencial de esquemas de inspección  $s \in S$ , lo que hace impracticable resolverla directamente. Para abordar esta complejidad, se utiliza un enfoque de Generación de Columnas (GC), donde se resuelve de manera iterativa un *Problema Maestro Restringido* (RMP) con un subconjunto reducido  $S_r \subset S$  y un *Subproblema de Pricing* (SP) que identifica nuevos esquemas de inspección con costo reducido positivo. El procedimiento comienza definiendo un problema restringido maestro (RMP) reemplazando  $S$  por  $S_r$  en MGLP-US. Sea  $Z_{RMP}^*$  el valor óptimo de RMP,  $\lambda_{ij}^* \geq 0$  y  $\theta^*$  los valores óptimos de las variables duales de las restricciones (19) y (20) respectivamente. Luego,  $Z_{RMP}^*$  es una solución óptima de MGLP-US si todos los costos reducidos son no-positivos, i.e.,  $\bar{c}_s = F \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} \lambda_{ij}^* Y_{j|s} - \theta^* \leq 0$ . Para generar más esquemas de inspección y verificar la optimalidad de la solución actual  $Z_{RMP}^*$  se

resuelve el siguiente problema:

$$\text{SP} : \max_{\mathbf{Y}} F \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} \lambda_{ij}^* Y_{j|s} - \theta^* \quad (23)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j \in J} Y_{j|s} \leq n \quad (24)$$

$$Y_{j|s} \in \{0, 1\} \quad \forall j \in J. \quad (25)$$

Si el valor óptimo de la función objetivo de SP es positivo, entonces se agrega al RMP el esquema de inspección  $\mathbf{Y}_s = \{Y_{j|s} : j \in J\}$  con máximo costo reducido  $\bar{c}_s$ . Por el contrario, si  $\bar{c}_s \leq 0$  entonces  $Z_{RMP}^*$  es una solución óptima de MGLP-US. Resolver MGLP-US mediante el procedimiento de generación de columnas conlleva a un esquema factible de inspección impredecible, donde  $\hat{S}_r = \{s \in S_r : \pi_s > 0\}$  es el conjunto de esquemas útiles. Se inicializa el RMP con un esquema que cubre los  $n$  sitios con menor probabilidad marginal de patrullaje  $\mathbb{P}_j$ . Esta elección refuerza los sitios con menor cobertura, promoviendo la diversificación de esquemas y la generación de nuevas columnas con costo reducido positivo. En el Algoritmo 1 se resume el procedimiento para la obtención de esquemas factibles de inspección impredecible.

---

**Algoritmo 1** Esquema factible de inspección impredecible

---

- 1:  $\{\mathbb{P}_j\}_{j \in J} \leftarrow$  solve MGLP-US
  - 2:  $\mathcal{J}_0 = \{j \in J : j \text{ con menores } \mathbb{P}_j, |\mathcal{J}_0| \leq n\}$
  - 3:  $s = 0$
  - 4: **Set**  $\bar{c}_s^{(0)} = \infty, \mathbf{Y}^{(0)} = 0$
  - 5:  $\boldsymbol{\lambda}^{(0)}, \theta^{(0)} \leftarrow$  solve RMP
  - 6: **while**  $\bar{c}_s^{(s)} > 0$  **do**
  - 7:      $s = s + 1$
  - 8:      $\bar{c}_s^{(s)}, \mathbf{Y}^{(s)} \leftarrow$  solve SP
  - 9:      $\boldsymbol{\lambda}^{(s)}, \theta^{(s)} \leftarrow$  solve RMP
  - 10: **end while**
  - 11: **return** Esquema de inspección impredecible:  $\{(s, \pi_s) : \pi_s > 0\}_{s \in S_r}, \mathbf{Y}$
-

La aplicación sistemática día a día del esquema factible de inspección impredecible obtenido del Algoritmo 1 permite que la frecuencia con la que se asignan equipos a un sitio  $j$  en particular converja a los valores definidos en la estrategia. No obstante, dentro de un horizonte de planificación de  $T$  días, la autoridad está interesada en conocer la proporción de infractores y residuos que son dirigidos al sitio legal como resultado de la implementación sistemática día a día de los esquemas impredecibles, mediante una planificación de  $k$  rondas de inspección diarias.

Sea  $f_{s\tau}$  la frecuencia con la que cada esquema de inspección  $s \in \hat{S}_\tau$  ha sido seleccionado hasta el período  $\tau \leq kT$ . Esta frecuencia determina la probabilidad marginal de patrullaje en cada sitio  $j \in J$ , la cual se incorpora directamente en la función de utilidad esperada de los contratistas de la cuadra  $i$  en el período  $\tau$ , definida como:

$$U_{i\tau} = \min \left\{ \min_{j \in J_0} \{B_{ij}\}, \quad \min_{j \in J} \left\{ C_{ij} + F \sum_{s \in \hat{S}_\tau} f_{s\tau} Y_{j|s} \right\} \right\}. \quad (26)$$

Así, si  $U_{i\tau} = \min_{j \in J_0} \{B_{ij}\}$ , los contratistas de la cuadra  $i$  optará por el sitio autorizado. Caso contrario, elegirá el sitio ilegal  $j$  que le proporcione menor costo percibido.

Con esta dinámica, se definen los indicadores  $I_{j\tau}^N$  y  $I_{j\tau}^W$  para cada sitio  $j \in J$ , que verifican proporción del total de contratistas y la proporción del total de residuos que se han ido a depositar al sitio  $j$  hasta el período  $\tau$ , respectivamente:

$$I_{j\tau}^N = \frac{\sum_{i \in I: U_i^\tau < \min_{j \in J_0} \{B_{ij}\}} d_i}{\sum_{i \in I} d_i} \quad \forall j \in J \quad (27)$$

$$I_{j\tau}^W = \frac{\sum_{i \in I: U_i^\tau < \min_{j \in J_0} \{B_{ij}\}} q_i}{\sum_{i \in I} q_i} \quad \forall j \in J. \quad (28)$$

El indicador agregado de Eliminación Efectiva (EE) en el período  $\tau$  se expresa como:

$$EE_{\tau} = 1 - \sum_{j \in J} I_{j\tau}^N, \quad (29)$$

lo que permite evaluar la fracción de contratistas efectivamente desviados hacia los sitios autorizados hasta el período  $\tau$ , mientras que el indicador agregado de Reducción de Residuos (WR) en el período  $\tau$  se expresa como:

$$WR_{\tau} = 1 - \sum_{j \in J} I_{j\tau}^W, \quad (30)$$

permitiendo evaluar la fracción de residuos desviados hacia los sitios autorizados hasta el período  $\tau$ .

### 7.3 Sobre la implementación práctica de la estrategia de inspección spot

Para reproducir el proceso de selección diaria de la autoridad de un esquema de inspección  $s \in \hat{S}_r$ , se consideran dos enfoques de simulación: **(i) Monte Carlo**, que sirve como línea base estocástica, y **(ii) GRASP** (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*), que introduce un sesgo informado por cobertura.

#### 7.3.1. Enfoque de Monte Carlo

En este enfoque la autoridad selecciona aleatoriamente un esquema  $s \in \hat{S}_r$  proporcionalmente al número de veces que se implementará el esquema. Sea  $\Upsilon_s = \lceil kT\pi_s \rceil$  el número total de veces que se implementará el esquema  $s$  durante los  $T$  días. En cada período  $t$  se selecciona un esquema  $s_t$  con probabilidad  $g_s = \frac{\Upsilon_s}{\sum_{s' \in \hat{S}_r} \Upsilon_{s'}}$ . Sin embargo, tras cada selección, las probabilidades se actualizan para reflejar las frecuencias restantes, descontando una unidad de  $\Upsilon_{s_t}$  para el esquema

$s_t$  seleccionado. Este procedimiento:

- respeta exactamente el número de veces que será seleccionado cada esquema  $s$
- es simple y rápido de implementar
- favorece esquemas con mayor probabilidad de selección  $g_s$ , pudiendo dejar fuera esquemas cruciales para la cobertura de ciertos sitios.

El procedimiento correspondiente se muestra en el Algoritmo 2.

---

**Algoritmo 2** Simulación de Monte Carlo para horizonte  $T$ 

---

- 1: Esquema de inspección impredecible  $\hat{S}_r : \{(s, \pi_s) : \pi_s > 0, s \in S_r\} \leftarrow$  Algoritmo 1
  - 2: Set  $D(T) = \{(s, \Upsilon_s) : \Upsilon_s = \lceil kT\pi_s \rceil, s \in \hat{S}_r\}$
  - 3: Set  $\bar{s} = \emptyset$
  - 4: **for**  $t = 1$  to  $kT$  **do**
  - 5:      $r = \sum_{s \in D(T)} \Upsilon_s$
  - 6:      $g_s = \frac{\Upsilon_s}{r}, \quad \forall (s, \Upsilon_s) \in D(T)$
  - 7:     Seleccionar  $s_t \in D(T)$  proporcionalmente a  $g_s$
  - 8:      $\bar{s} = \bar{s} \cup \{s_t\}$
  - 9:      $\Upsilon_{s_t} = \Upsilon_{s_t} - 1$
  - 10: **end for**
  - 11: **return**  $\bar{s} = \{s_t\}_{t=1}^{kT}$
- 

### 7.3.2. Enfoque GRASP

El procedimiento GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*) simula la decisión de una autoridad que incorpora información de cobertura histórica en su proceso de selección.

En cada período  $t$ , se calcula la probabilidad estimada de inspección  $\hat{P}_j$  para cada sitio  $j \in J$ , donde  $h_s$  representa el número de veces que el esquema  $s$  ha sido seleccionado hasta  $t$ , y  $f_s = h_s/t$  denota su frecuencia de selección relativa hasta el período  $t$ . A partir de los valores de

los esquemas de inspección  $Y_s$  del Algoritmo 1 se obtiene:

$$\hat{P}_j = \sum_{s \in \hat{S}_r} f_s Y_{j|s} \quad \forall j \in J \quad (31)$$

$$\sigma_j = \frac{1}{\hat{P}_j + \varepsilon} \quad \forall j \in J. \quad (32)$$

Para cada esquema  $s$  se define el valor de cobertura agregada:

$$CV_s = \sum_{j \in J} \sigma_j Y_{j|s} \quad \forall s \in S^+(t), \quad (33)$$

que prioriza los esquemas que cubren sitios escasamente cubiertos hasta el período  $t$ , donde los esquemas activos ( $S^+(t)$ ) son aquellos esquemas  $s$  con  $\Upsilon_s > 0$  en el período  $t$ . Se selecciona un esquema  $s_t$  a partir de una lista restringida de candidatos (RCL), y se descuenta una unidad de  $\Upsilon_{s_t}$ .

El Algoritmo 3 muestra el procedimiento correspondiente:

---

**Algoritmo 3** Simulación de GRASP para horizonte  $T$ 

---

- 1: Esquema de inspección impredecible  $\hat{S}_r : \{(s, \pi_s) : \pi_s > 0, s \in S_r\} \leftarrow$  Algoritmo 1
  - 2: Plan de inspección  $Y_{j|s} \leftarrow$  Algoritmo 1  $\forall j \in J, s \in \hat{S}_r$
  - 3: Set  $D(T) = \{(s, \Upsilon_s) : \Upsilon_s = \lceil kT \pi_s \rceil, s \in \hat{S}_r\}$
  - 4: Set  $h_s = 0, \forall s \in D(T)$
  - 5:  $\bar{s} \leftarrow \emptyset$
  - 6: **for**  $t = 1$  **to**  $kT$  **do**
  - 7:  $f_s = \frac{h_s}{t}, \forall s \in D(T)$
  - 8:  $S^+(t) = \{s \in D(T) : \Upsilon_s > 0\}$
  - 9:  $s_t \leftarrow$  **Constructor**( $f, Y, S^+(t)$ )
  - 10:  $\bar{s} = \bar{s} \cup \{s_t\}$
  - 11:  $h_{s_t} = h_{s_t} + 1$
  - 12:  $\Upsilon_{s_t} = \Upsilon_{s_t} - 1$
  - 13: **end for**
  - 14: **return**  $\bar{s} = \{s_t\}_{t=1}^{kT}$
-

---

**Algoritmo 4** Constructor

---

- 1:  $\hat{P}_j = \sum_{s \in D(T)} f_s Y_{j|s} \quad \forall j \in J$
  - 2:  $\sigma_j = \frac{1}{\hat{P}_j + \varepsilon} \quad \forall j \in J$
  - 3:  $\mathbf{CV}_s = \sum_{j \in J} \sigma_j Y_{j|s} \quad \forall s \in S^+(t)$
  - 4:  $m = \min_{s \in S^+(t)} \{\mathbf{CV}_s\}, \quad M = \max_{s \in S^+(t)} \{\mathbf{CV}_s\}$
  - 5:  $\theta =$  segundo valor más grande de  $\{\mathbf{CV}_s : s \in S^+(t)\}$  ( $\theta = M$  si  $|S^+(t)| < 2$ )
  - 6: **if**  $m = M$  **then**
  - 7:      $\alpha_{\text{máx}} = 1$
  - 8: **else**
  - 9:      $\alpha_{\text{máx}} = \frac{\theta - m}{M - m}$
  - 10: **end if**
  - 11: Seleccionar  $\alpha \sim \mathcal{U}[0, \alpha_{\text{máx}}]$
  - 12:  $\text{RCL} = \{s \in S^+(t) : \mathbf{CV}_s \geq \alpha M + (1 - \alpha)m\}$
  - 13: Seleccionar  $s_t \in \text{RCL}$  aleatoriamente
  - 14: **return**  $s_t$
- 

Dado que el Algoritmo 1 puede generar pequeño conjunto  $\hat{S}_r$  de esquemas factibles, se establece una condición para los valores de  $\alpha$  en el Algoritmo 4 tal que, para que exista variabilidad dentro de la elección en RCL, se debe cumplir para cada período  $t$ :

$$\alpha \leq \frac{\theta - m}{M - m}, \quad (34)$$

donde  $\theta$  es el segundo valor más grande de  $\mathbf{CV}_s$  para los  $s \in S^+(t)$  en el período  $t$ .

## 8 Caso de estudio

En esta sección se presenta la estrategia de inspección, el esquema de inspección impredecible y la simulación de la selección esquemática día a día. Para ello, se emplearon los Algoritmos 1, 2 y 3, que implementan los enfoques de Monte Carlo y GRASP para la selección esquemática.

Los experimentos computacionales se realizan en la ciudad de Valparaíso, donde existen 27 sitios de microbasurales reportados por la información oficial del municipio. La ciudad dispone de un relleno sanitario que constituye el principal sitio legalmente autorizado para la disposición de escombros y residuos varios. Administrativamente, Valparaíso cuenta con 4232 cuadras en su organización territorial, de las cuales 493 han visto actividad constructiva desde el año 2018.

Para el modelo, se representa Valparaíso con  $|I| = 493$  cuadras homogéneas,  $|J| = 27$  sitios ilegales y  $|J_0| = 1$  sitio autorizado. La Figura 5 muestra el conjunto de sitios  $J \cup J_0$ .

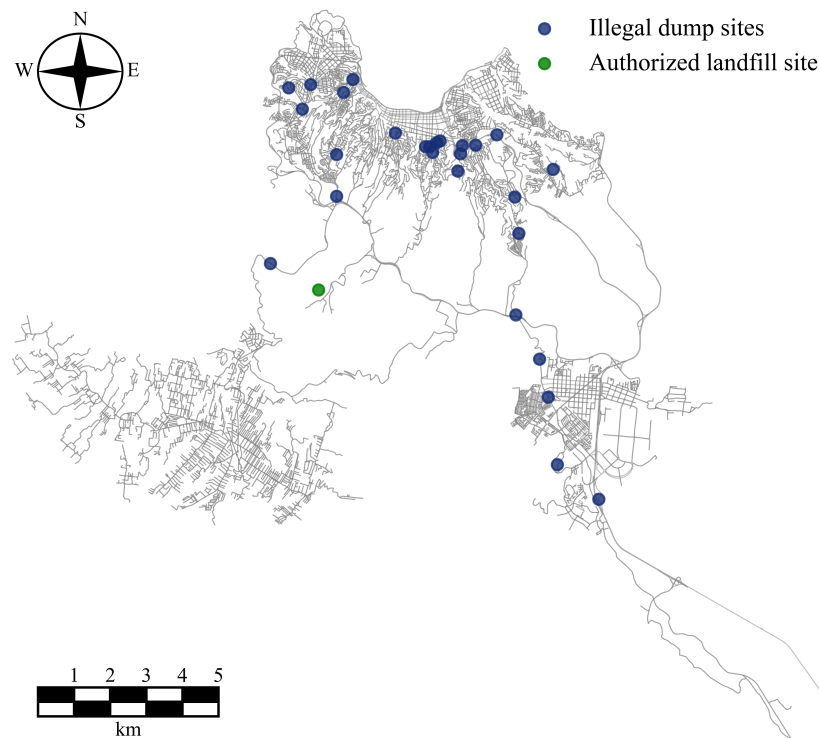


Figura 5: Distribución de los microbasurales en Valparaíso

Para la obtención de esquemas de inspección impredecibles se consideró una cantidad de  $n = 7$  equipos de vigilancia y una multa de  $F = 2\,000\,000$  [CLP]. El tiempo de implementación es de  $T = 250$  días. Además, consideramos  $k = 2$  ventanas de inspección durante el día, de 8-12 am y 3-7 pm, i.e.,  $\Pi = \{[8 : 00, 12 : 00], [15 : 00, 19 : 00]\}$  según lo estudiado por Jiang et al. (2020). La tarifa de traslado y entrada al sitio legal está estimada en 9 000 [CLP/ton] de residuo para cualquier  $i \in I$  (Rodríguez, 2021). La proporción de residuos dispuestos de manera ilegal por particulares puede alcanzar hasta el 58 % (Ngalo y Thondhlana, 2023) bajo ciertas condiciones. De forma similar, el porcentaje de RCD gestionado de manera ilegal en Hanói se ha estimado en un 55 % (Nguyen et al., 2023). Para la simulación de la decisión de la autoridad, se generaron 30 instancias independientes.

Los Algoritmos 1, 2 y 3 se ejecutaron en Python 3.9.12. Los modelos MGLP, RMP y SP son resueltos usando CPLEX 22.1.1. Todas las pruebas fueron ejecutadas en un PC con un procesador AMD Ryzen 7 de 2.3 GHz y 8 GB RAM.

## 8.1 La estrategia spot marginal para la autoridad

La estrategia de MGLP, i.e., la distribución espacial de las probabilidades de inspección, depende del número de equipos de inspección desplegados en el territorio. Es racional pensar que la autoridad está interesada en determinar el menor número de equipos de inspección que induce un valor de WR dado. Para ello, se resolvió MGLP para diferentes valores de  $n$  y se computó WR en la Figura (6).

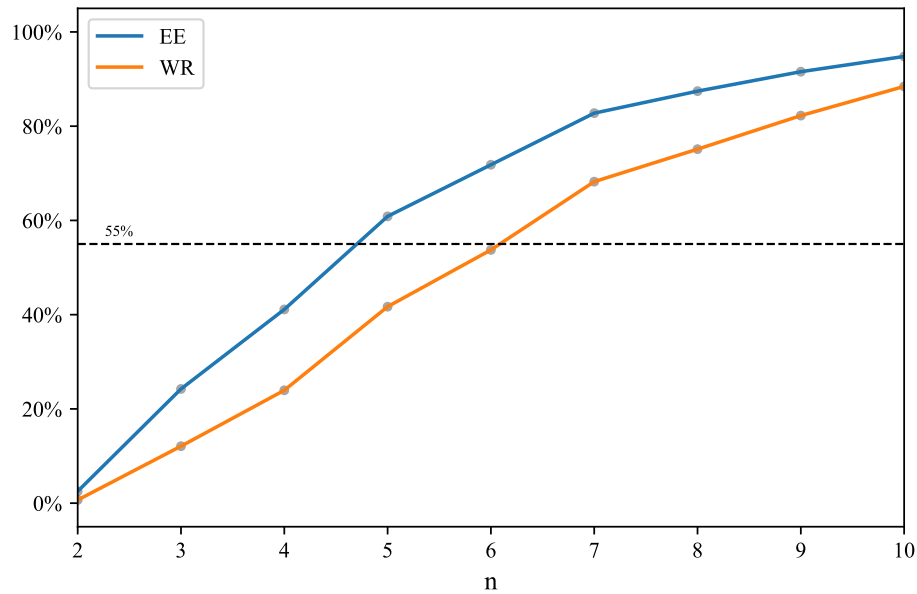


Figura 6: Eliminación Efectiva y Reducción de Residuos con  $F = 2\,000\,000$

La Figura 6 muestra cómo la decisión de los contratistas cambia ante el aumento del número de equipos de inspección. La Reducción de Residuos se mantiene por debajo del 55 % para  $n \leq 6$  equipos de inspección, mientras que para un número de equipos menor o igual a 4 la Eliminación Efectiva también se encuentra por debajo del umbral. Por otro lado, con  $n = 7$  equipos de inspección se alcanza una Reducción de Residuos del 68 %, mientras que para el mismo número de equipos la Eliminación Efectiva es del 83 %. Como resultado práctico se observa que, para una multa  $F = 2\,000\,000$ , el número más pequeño de equipos de inspección que requiere la autoridad para inducir un WR mayor o igual al 55 % es de 7 equipos.

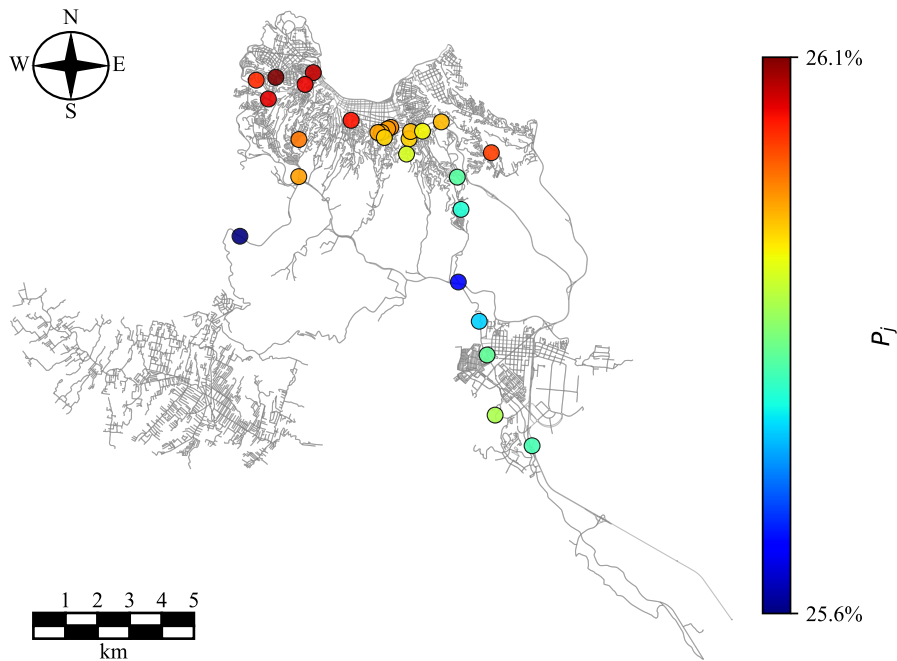


Figura 7: Distribución espacial de las probabilidades de inspección con  $n = 7$  y  $F = 2\,000\,000$

La Figura 7 muestra la distribución espacial de las probabilidades de inspección de la estrategia. Se puede observar que la autoridad determina una probabilidad de inspección superior para las ubicaciones que más generan residuos (Anexo 10.3). Por otro lado, los sitios de disposición ilegal más cercanos al vertedero autorizado (Figura 5) presentan una probabilidad de inspección menor.

## 8.2 La estrategia de inspección impredecible

La aplicación del método de generación de columnas para la obtención de esquemas de inspección impredecible permitió identificar un total de  $|\hat{S}_r| = 27$  esquemas de inspección aleatoria, considerando la disponibilidad de  $n = 7$  equipos.

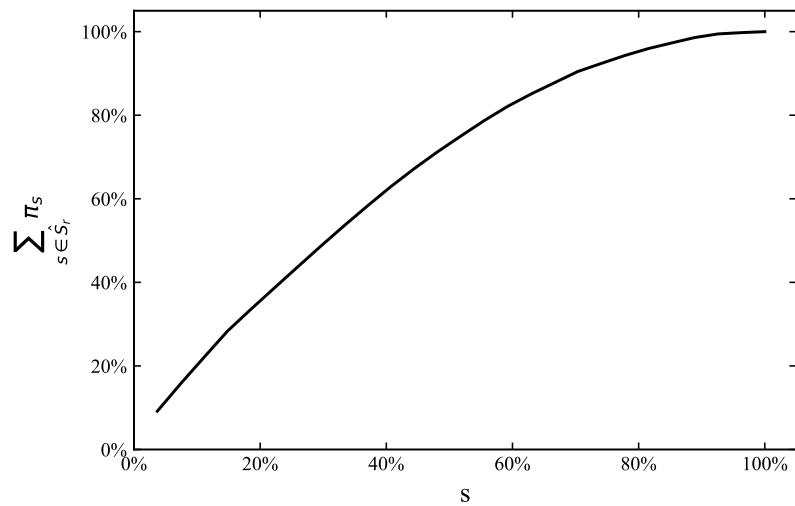


Figura 8: Función de distribución de probabilidad asociada a la selección de esquemas de inspección aleatorios

Tal como se evidencia en la Figura 8, se observa una distribución desigual en las probabilidades de selección de los esquemas. En particular, el 70 % de los esquemas concentra más del 50 % de la probabilidad total de selección. Asimismo, aproximadamente el 93 % de los esquemas acumula alrededor del 84 % de la probabilidad total.

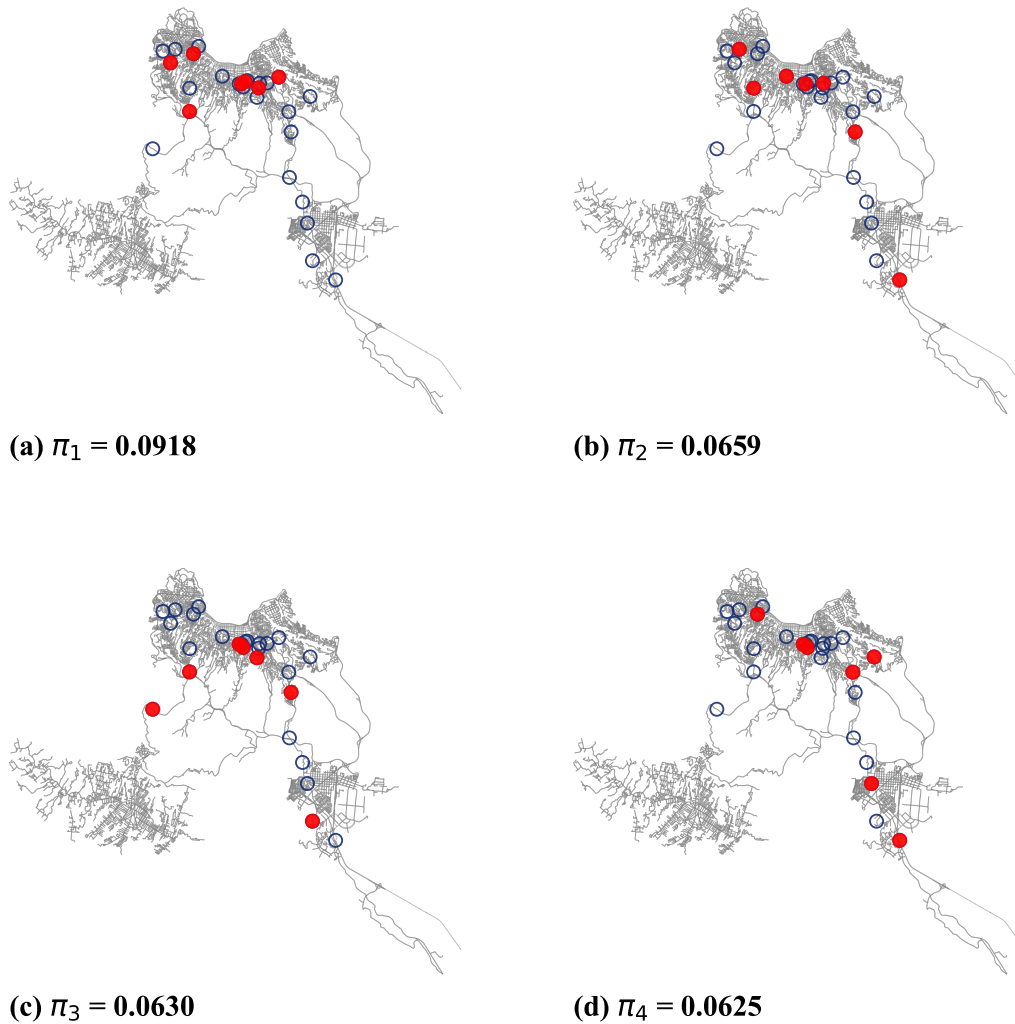


Figura 9: Esquemas de inspección de equipos con  $n = 7$

La Figura 9 muestra los cuatro esquemas de inspección más probables de ser seleccionados en la implementación periódica. Las probabilidades de selección de los esquemas son  $\pi_1 = 9,18\%$ ,  $\pi_2 = 6,59\%$ ,  $\pi_3 = 6,30\%$ ,  $\pi_4 = 6,25\%$ , respectivamente. Los esquemas de inspección son consistentes con la estrategia spot, donde los esquemas  $s = 1, 2, 4$  cubren los puntos de mayor probabilidad de inspección en la Figura 7, mientras que el esquema  $s = 3$  está cubriendo algunas de las ubicaciones con menor probabilidad de inspección.

### 8.3 Simulación del plan de implementación

Evaluamos dos formas de materializar en el tiempo las probabilidades de inspección  $\pi_s$  obtenidas del RMP: (i) una simulación proporcional tipo **Monte Carlo** (Algoritmo 2) y (ii) un procedimiento **GRASP** con selección por cobertura y  $\alpha$  dinámico (Algoritmo 3). En todos los casos se considera un horizonte de  $T = 250$  días con dos inspecciones diarias, y para cada configuración se realizan 30 instancias independientes. Los resultados se muestran con la media y el intervalo de confianza (IC) del 95 % correspondiente.

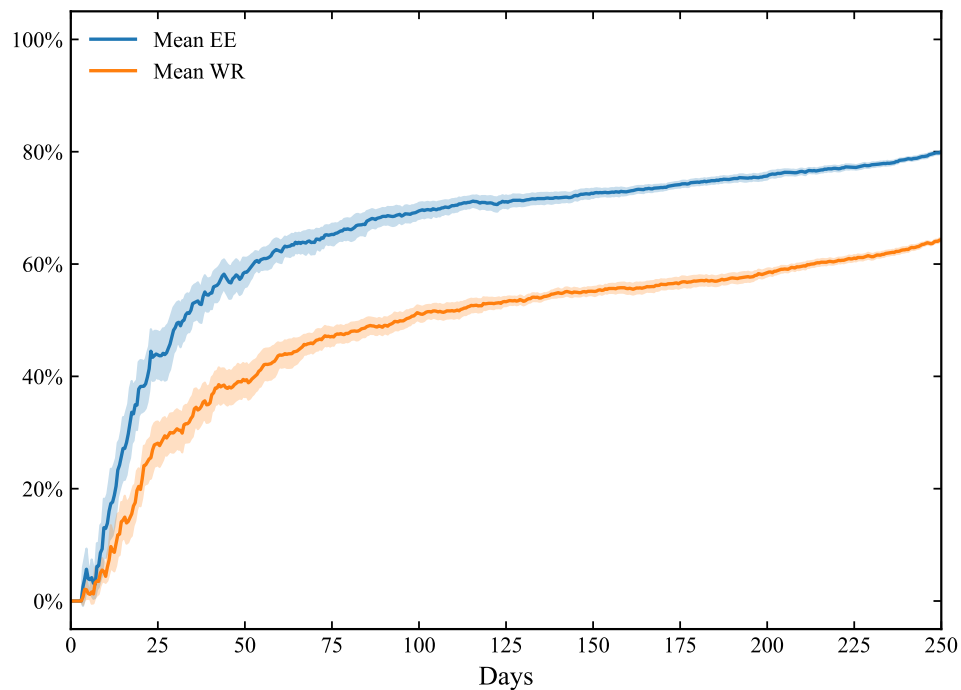


Figura 10: Evolución temporal de la Reducción de Residuos y la Eliminación Efectiva bajo el enfoque Monte Carlo (IC 95 %)

La Figura 10 muestra la evolución de la Reducción de Residuos (WR) y la Eliminación Efectiva (EE) bajo el enfoque de Monte Carlo proporcional. La Reducción de Residuos alcanza

un 55 % alrededor del día 150, donde la Eliminación Efectiva alcanza un valor del 73 %. A partir del día 200 los valores de los indicadores se mantienen relativamente, con valores de 58 % y 76 % para la Reducción de Residuos y la Eliminación Efectiva, respectivamente. La diferencia entre los valores de ambos indicadores radica en la diferencia en la distribución de  $d_i$  y  $q_i$ : muchas de las cuadras con contratistas generan poca cantidad de residuos, mientras que pocas cuadras generan muchos residuos, lo que hace que sea más difícil inducirlos a ir a los sitios legales, pues su costo legal depende directamente de la gran cantidad de residuos  $q_i$  que generan.

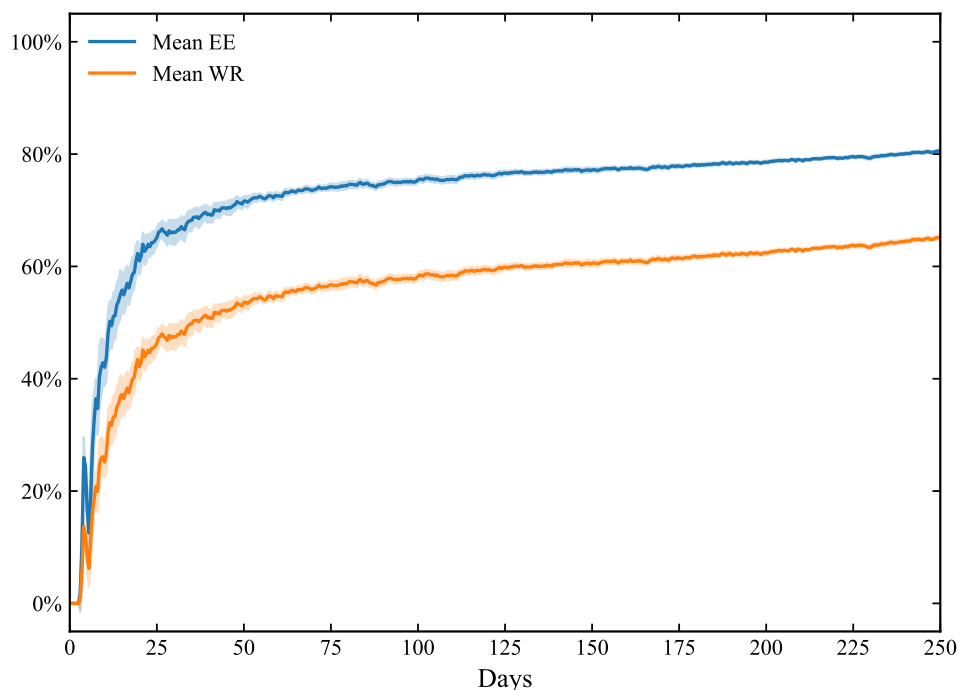


Figura 11: Evolución temporal de la Reducción de Residuos y la Eliminación Efectiva bajo el enfoque GRASP con  $\alpha$  dinámico (IC 95 %)

La Figura 11 presenta el desempeño del enfoque GRASP con parámetro  $\alpha$  dinámico. A diferencia del método Monte Carlo, el Algoritmo Constructor prioriza esquemas que cubren sitios con baja cobertura acumulada mediante el criterio  $CV_s$ . Esta estrategia acelera la convergencia

de la frecuencia de inspección, lo que se traduce en un crecimiento sostenido de la Reducción de Residuos (WR), alcanzando el umbral del 55 % en el día 60, mientras que la Eliminación Efectiva (EE) alcanza un valor del 73 %. Por otro lado, al día 200 el indicador WR llega a tan solo 63 %, mientras que EE aumenta hasta 79 %. La variabilidad observada en los resultados es atribuible al tamaño reducido del conjunto de esquemas  $|\hat{S}_r| = 27$  y a la aleatoriedad inherente del proceso de Lista Restringida de Candidatos (RCL).

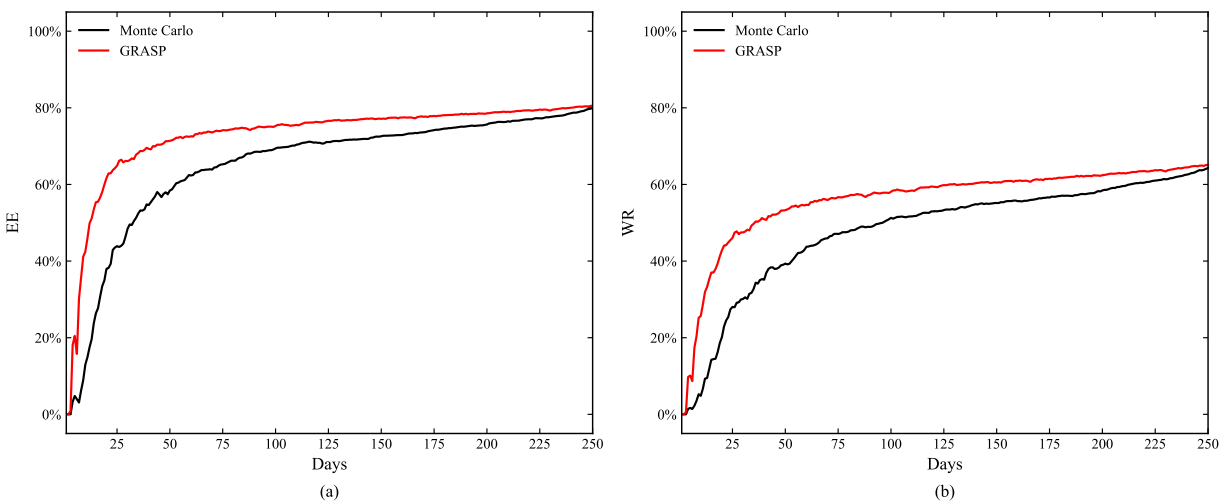


Figura 12: Evolución temporal de (a) Eliminación Efectiva (EE) y (b) Reducción de Residuos (WR), según los enfoques de Monte Carlo y GRASP

La Figura 12 evidencia con claridad que el enfoque GRASP basado en cobertura presenta un rendimiento superior al de la estrategia proporcional de Monte Carlo, tanto en la efectividad de la Eliminación Efectiva de infractores como en la optimización de la Reducción de Residuos. Esta ventaja operativa se fundamenta en la capacidad de GRASP de gestionar dinámicamente el parámetro  $\alpha$ , lo que permite una convergencia significativamente más rápida hacia los valores definidos por la estrategia marginal en MGLP.

Lo anterior subraya la importancia de implementar una estrategia que logre maximizar la cobertura de sitios previamente no inspeccionados. Dado que la estrategia marginal impone una



probabilidad de inspección estrictamente positiva en todos los puntos, priorizar la cobertura elimina vulnerabilidades críticas, impidiendo que los infractores puedan explotar áreas de baja vigilancia para depositar sus residuos. Por consiguiente, la selección de una estrategia que minimice proactivamente el conjunto de sitios desatendidos es crucial para la robustez de la estrategia de inspección.

## 9 Conclusiones

Este trabajo abordó el diseño de una estrategia de inspección spot y su implementación operacional para inhibir la formación de microbasurales en la comuna de Valparaíso, utilizando un enfoque de juego de Stackelberg y esquemas de inspección impredecibles para los equipos de vigilancia. Los contratistas (seguidores) eligen libremente el sitio de disposición que minimice su costo esperado, considerando los costos de transporte y disposición al sitio autorizado, y el riesgo de una multa. La autoridad (líder) determina la distribución de probabilidades de inspección sobre la red de sitios ilegales con el fin de maximizar el costo esperado de los infractores, incentivándolos así a utilizar el sitio legal.

Los principales aportes de este trabajo se resumen en lo siguiente. Primero, se provee bajo un enfoque de Stackelberg, un modelo conjunto para el diseño de una estrategia spot y su implementación operacional mediante esquemas impredecibles en el contexto de la gestión de residuos sólidos y microbasurales. Segundo, se propone un mecanismo para operacionalizar la estrategia óptima, traduciendo las probabilidades de inspección en un conjunto manejable de esquemas de inspección de equipos, cada uno con una frecuencia específica de implementación. Tercero, se define un enfoque eficiente, basado en Generación de Columnas, para generar dicho plan de inspección impredecible que aprovecha la estructura de la estrategia spot óptima. Cuarto, se incorpora un mecanismo de simulación (Monte Carlo y GRASP) para evaluar el tiempo requerido para que la estrategia alcance su efectividad en un horizonte finito, crucial para su aplicación práctica.

Los experimentos numéricos realizados en la comuna de Valparaíso muestran que el modelo de optimización y el procedimiento de generación de columnas entregan soluciones de alta calidad. Se identificó que, para una multa de \$2 000 000, se determinó que se requieren al menos 7

equipos para inducir una tasa de Reducción de Residuos superior al 55 %, desviando a los infractores hacia el sitio de disposición autorizado. La magnitud de los esfuerzos recalcan la necesidad de tener multas que "duelan" de forma significativa, mientras que el análisis detallado permite destacar la importancia de la distribución de la generación de residuos: pocos infractores son los que más generan, mientras que muchos infractores generan poco.

Sin embargo, la naturaleza dinámica y espacial del problema impone desafíos prácticos críticos en la fase de implementación. En primer lugar, se identificó que la frecuencia de vigilancia de cada sitio de microbasural debe ser estrictamente positiva. Una calendarización basada puramente en las probabilidades de selección de cada esquema ( $\pi_s$ ) conlleva el riesgo de posponer u omitir en el corto plazo la visita a sitios con baja probabilidad marginal dentro de la estrategia óptima. En un horizonte finito, los algoritmos de selección aleatoria proporcional (como el Monte Carlo estándar) pueden priorizar esquemas que cubren múltiples sitios "populares", dejando de lado (aunque temporalmente) aquellos que cubren un único sitio remoto o de menor prioridad. Este retraso en la cobertura permite a los infractores aprender y explotar dicha predictibilidad temporal, desplazándose a estos sitios no vigilados durante periodos extensos, lo que limita la efectividad disuasiva de la estrategia en el mediano plazo.

En segundo lugar, los resultados de la simulación destacan la necesidad crítica de considerar explícitamente la cobertura en la administración diaria de los esquemas. El enfoque GRASP, que incorpora de manera adaptativa la cobertura histórica acumulada de cada sitio para priorizar esquemas que visitan ubicaciones poco vigiladas, mostró una convergencia significativamente más rápida de los indicadores de Eliminación Efectiva y Reducción de Residuos en comparación con el método Monte Carlo. Esto confirma que, para ser operativamente útil, el plan de implementación no puede basarse únicamente en las probabilidades  $\pi_s$  (horizonte infinito), sino que debe admi-

nistrar estratégicamente el tiempo y la secuencia en la activación de los esquemas. La autoridad debe asegurar una cobertura lo más uniforme y rápida posible de toda la red de sitios para inducir la percepción de riesgo en los infractores desde el inicio de la implementación. No es posible administrar el tiempo de forma pasiva: se requiere un protocolo activo que anticipe y compense los desbalances de cobertura que surgen naturalmente en un horizonte finito.

Como líneas de investigación futura, se proponen: extender el modelo para considerar infractores adaptativos, capaces de observar y aprender de los patrones de vigilancia pasados para ajustar su comportamiento en tiempo real, incorporar restricciones operativas adicionales en la generación de esquemas, como tiempos de viaje entre sitios, ventanas de tiempo y disponibilidad dinámica de recursos, explorar el diseño óptimo de rutas de patrullaje (en lugar de asignaciones estáticas spot) que permitan a un equipo cubrir múltiples sitios en una misma jornada, integrando el modelo con problemas de ruteo vehicular, e incluir en la función objetivo de la autoridad los costos operativos de desplazamiento y vigilancia, con el fin de considerar tanto el beneficio de la disuasión como el costo de implementación.

En síntesis, este trabajo provee un marco analítico y computacional para transformar una estrategia de vigilancia óptima en un plan operativo factible y efectivo. Los resultados subrayan que el éxito de la política no depende sólo de la estrategia spot óptima en el papel, sino de una implementación inteligente que considere la cobertura espacial y temporal para inducir incertidumbre y maximizar la disuasión desde el primer día de operación.

## 10 Anexos

### 10.1 Base de datos y caracterización inicial

La base de datos de permisos de edificación del Instituto Nacional de Estadísticas (INE) comprende el período 2010-2024. Cada registro contiene información sobre localización geográfica, superficie autorizada, número de pisos y glosa de destino, entre otras variables relevantes. Las principales columnas disponibles son:

- **COD\_REGION**: Código numérico de la región donde se ubica el permiso de edificación.
- **COD\_COMUNA**: Código numérico de la comuna donde se localiza el permiso.
- **AÑO**: Año en que se otorgó el permiso de edificación.
- **CANTIDAD\_UNIDAD**: Número de unidades de construcción autorizadas en el permiso.
- **NUM\_PISOS**: Cantidad de pisos que considera el proyecto autorizado.
- **GLOSA\_DESTINO**: Glosa o descripción del uso de destino de la edificación (por ejemplo: vivienda, comercio, educación).
- **USO\_DESTINO**: Clasificación estandarizada del uso de destino.
- **SUPERFICIE**: Superficie autorizada en metros cuadrados para la construcción.
- **geometry**: Datos geospaciales del permiso. Esta base de datos contiene objetos de tipo POINT, que representan las ubicaciones geográficas exactas asociadas a los permisos de edificación.

Como muestra de la información presente en la base de datos, en la Figura 13 se observa la distribución de los permisos de edificación en Valparaíso durante el año 2020.

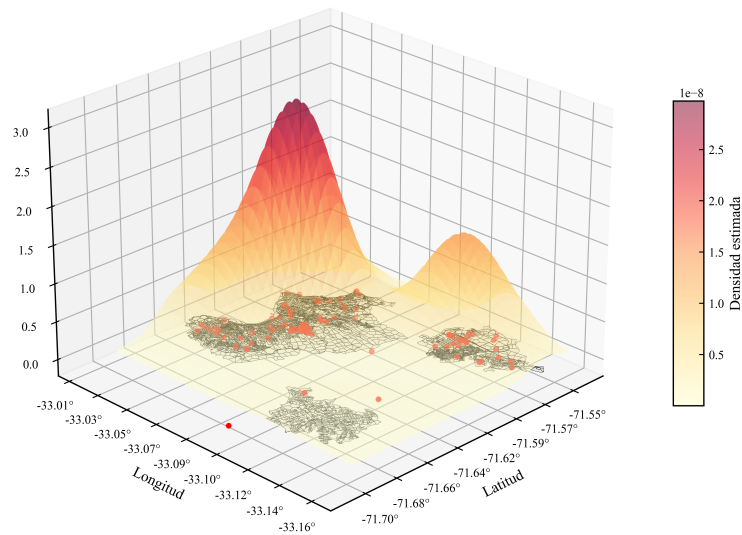


Figura 13: Distribución de los permisos de edificación durante 2020

## 10.2 Ajuste de polígonos de cuadras

El área urbana de Valparaíso considera un total de 4232 polígonos de cuadra. Sin embargo, como se observa en la Figura 14, algunas cuadras de gran superficie (superiores al percentil 95 de la distribución) concentran las edificaciones solo en zonas acotadas de su perímetro, lo que genera un sesgo en la estimación de densidad de permisos de edificación.

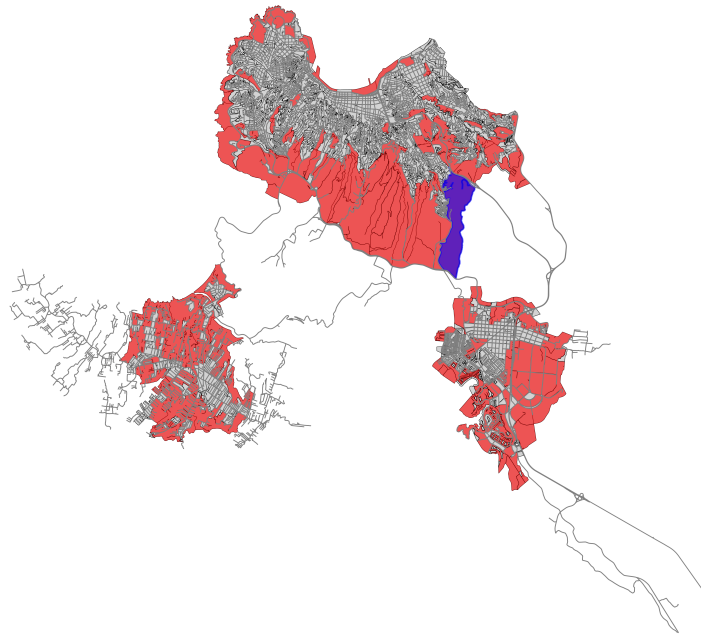


Figura 14: En rojo, las cuadras cuya superficie supera el percentil 95. En azul, la cuadra de mayor tamaño de Valparaíso, con  $1,93 \text{ km}^2$

Para mitigar este efecto, se aplicó un procedimiento de subdivisión de las cuadras más extensas mediante un esquema combinado de *k-means clustering* y diagramas de Voronoi, descrito a continuación:

1. **Identificación de cuadras grandes:** se calculó el área de cada cuadra y se seleccionaron aquellas cuya superficie superaba el percentil 95.
2. **Generación de puntos internos:** para cada cuadra seleccionada se generaron puntos aleatorios al interior de su polígono.
3. **Agrupamiento con *k-means*:** el número de clústeres  $k$  se determinó como<sup>1</sup>:

$$k = \max \left( 2, \text{trunc} \left( \frac{\text{Área de la cuadra}}{\text{Área máxima por clúster}} \right) \right),$$

<sup>1</sup>Donde *trunc()* es la función de truncamiento entero.

utilizando un umbral de  $100,000 m^2$  como superficie máxima deseada por subunidad.

4. **Construcción del diagrama de Voronoi:** los centroides obtenidos con *k-means* se emplearon como semillas para generar un diagrama de Voronoi, el cual fue intersectado con la geometría original de la cuadra, obteniéndose así polígonos no superpuestos y homogéneos.

Como resultado, se generaron subdivisiones para las cuadras más extensas, aumentando el número de unidades espaciales desde 4232 a 4541. Las nuevas unidades se adoptaron como conjunto base *I* del estudio, con el propósito de reducir el sesgo originado por la concentración de permisos en polígonos de gran tamaño y de asegurar una representación territorial más homogénea para la estimación de densidades. La Figura 15 ilustra el procedimiento descrito anteriormente:

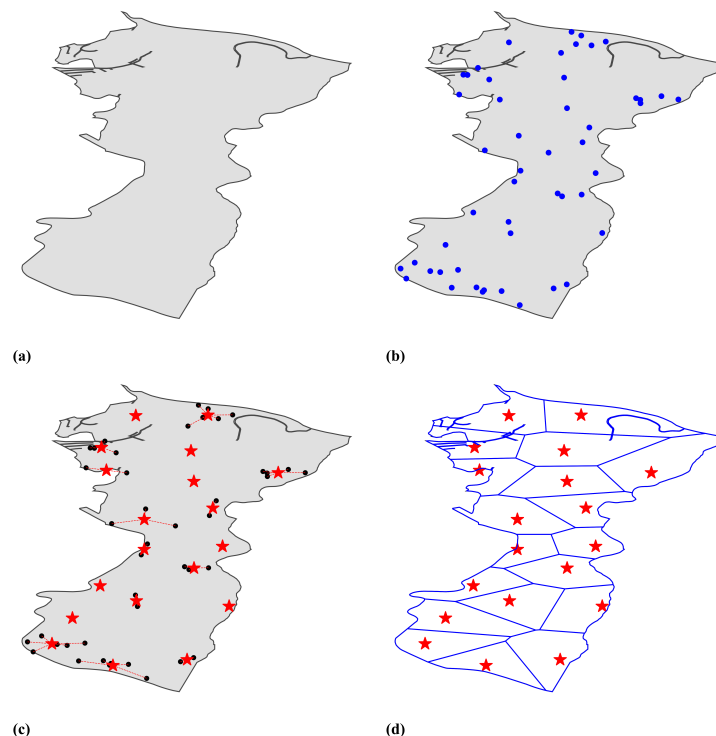


Figura 15: (a) Cuadra de mayor tamaño, (b) Generación de puntos aleatorios internos, (c) Agrupamiento de los centroides y (d) Construcción de polígonos de Voronoi

### 10.3 Estimación de demanda de infractores y generación de residuos

Sea  $I$  el conjunto de cuadras (unidades espaciales) con centroides  $s_i \in \mathbb{R}^2$  expresados en un sistema de referencia proyectado métrico (p. ej., EPSG:32719), y sea

$$T = \{2018, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023, 2024\}$$

el conjunto de años considerados. Para cada año  $t \in T$  se dispone del conjunto de permisos de edificación  $P^t$ . Cada permiso  $p \in P^t$  está asociado a una cuadra  $i_p \in I$  y a una superficie autorizada  $S_p$ .

#### 10.3.1. Conteo de permisos por cuadra y año

El conteo de permisos de edificación (PE) por cuadra en el año  $t$  se define como

$$c_i^t = \sum_{p \in P^t} \mathbb{1}\{i_p = i\}, \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \quad (35)$$

donde  $\mathbb{1}\{\cdot\}$  es la función indicadora. Esta cantidad representa el total anual de permisos en la cuadra  $i$ .

#### 10.3.2. Estimación de RCD por permiso, cuadra y año

La generación estimada de residuos de construcción y demolición (RCD) asociada a cada permiso  $p$  se calcula como

$$r_p = S_p \cdot \varphi, \quad \forall p \in \bigcup_{t \in T} P^t, \quad (36)$$

donde  $\varphi$  es el coeficiente de generación de toneladas de RCD apartir de la superficie, igual a 0,240 [ton/m<sup>2</sup>]. Al agregar por cuadra y año:

$$r_i^t = \sum_{p \in P^t} r_p \mathbb{1}\{i_p = i\}, \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \quad (37)$$

donde  $r_i^t$  es la cantidad total de RCD (en toneladas) asignada a la cuadra  $i$  en el año  $t$ .

### 10.3.3. Selección del máximo temporal por cuadra

Para caracterizar la demanda máxima por cuadra a lo largo del periodo 2018–2024 se toman los valores máximos año a año de las series {permisos, RCD}. Definiendo

$$d_i^t := c_i^t, \quad (\text{total de PE en la cuadra } i \text{ en el año } t), \quad (38)$$

$$q_i^t := r_i^t, \quad (\text{total de RCD en toneladas en la cuadra } i \text{ en el año } t), \quad (39)$$

se construyen las cantidades máximas por cuadra en el periodo mediante

$$d_i = \max_{t \in T} \{d_i^t\}, \quad q_i = \max_{t \in T} \{q_i^t\}, \quad \forall i \in I. \quad (40)$$

Las magnitudes  $d_i$  y  $q_i$  condensan la intensidad constructiva máxima observada y la generación máxima de RCD observada en la cuadra  $i$  durante el período de tiempo dado, y se emplean como entradas del resto del modelo. La Figura 16 muestra la distribución espacial de  $d_i$  y  $q_i$  respectivamente.

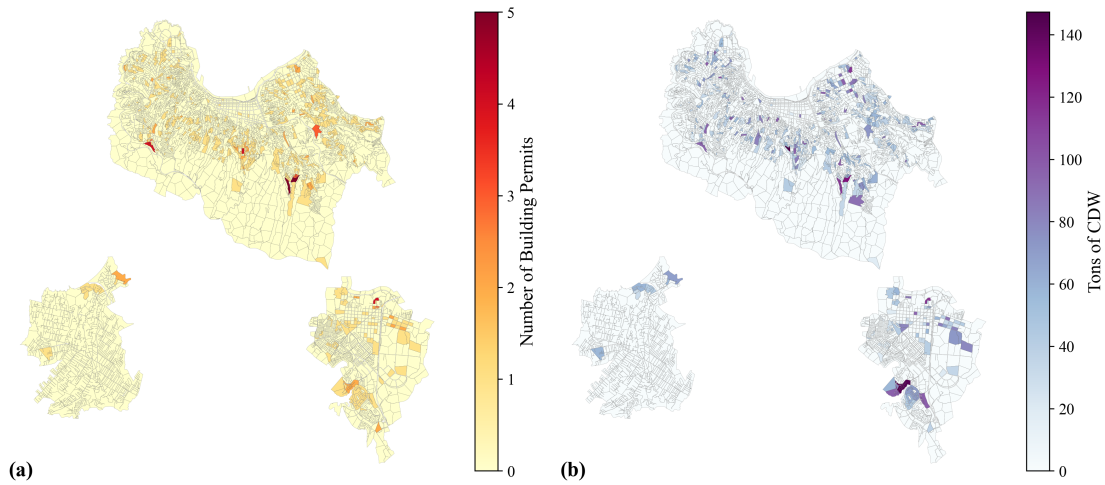


Figura 16: (a) Densidad de permisos de edificación, (b) Distribución de RCD generados

#### 10.4 Costos de transporte y entrada

La distancia de transporte  $L_{ij}$  desde la cuadra  $i \in I$  hacia un sitio  $j \in J \cup J_0$  se estimó utilizando el algoritmo de ruta mínima de Dijkstra sobre la red vial urbana. El costo de transporte (considerando ida y retorno) se calculó como:

$$C_{ij} = \frac{2 \cdot L_{ij} \cdot p \cdot n_i}{r}, \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \quad (41)$$

donde  $p$  corresponde al precio promedio por litro de combustible (diésel) y  $r$  al rendimiento de un vehículo de carga, expresado en kilómetros por litro y  $n_i = \lceil \frac{q_i}{kd_i} \rceil$  el número de viajes que debe realizar un contratista de la cuadra  $i$  en promedio para botar sus residuos en un vehículo con capacidad de carga  $k$ . Para el presente estudio se adoptaron valores de referencia de  $p = 1000$  [CLP/l],  $r = 6$  [km/l] y  $k = 20$  [ton].

En el caso del costo de disposición en los sitios autorizados ( $B_{ij}$ ), este se compone del costo de traslado y un costo de disposición. Según lo estudiado por Rodríguez (2021) se señala

que en promedio, el costo total de traslado y disposición en Chile es de  $G_{ij} = 9000$  [CLP/ton] de residuos. Así, para solo un sitio de disposición  $j \in J_0$ :

$$B_{ij} = G_{ij} \cdot \frac{q_i}{d_i}, \quad \forall i \in I, \forall j \in J_0, \quad (42)$$

con  $|J_0| = 1$  en Valparaíso.

## Referencias

- ADAPT Chile (2016). Antecedentes del Manejo y Gestión de Residuos en Chile.
- Al-Dhaheri S. M. y Burhan A. M. (2022). Evaluation of construction and demolition waste recycling sites within Iraq. *Innovative Infrastructure Solutions*, 7:1–14.
- Arboleda N. (2009). Programa de manejo integral de residuos sólidos en el parque nacional natural Gorgona, Cauca, Colombia. Memoria para optar al título de administrador del medio.
- Barakat B. y Srour I. (2024). Consideration of hotspots in the selection of supervision schemes to reduce illegal dumping of construction and demolition waste. *Waste Management & Research*, 42(2):146–157. PMID: 37386893.
- Bernache G. (1998). *Basura y Metrópoli. Gestión social y pública de los residuos sólidos municipales en la zona metropolitana de Guadalajara*. Universidad de Guadalajara, Guadalajara.
- Cerdá E., Pérez J., y Jimeno J. L. (2004). *Teoría de Juegos*. Pearson Educación S.A., Madrid.
- Cerrato E. (2006). Gestión integral de residuos sólidos.
- Chen J., Hua C., y Liu C. (2019). Considerations for better construction and demolition waste management: Identifying the decision behaviors of contractors and government departments through a game theory decision-making model. *Journal of Cleaner Production*, 212:190–199.
- Chicoisne R., Ordóñez F., y Castro D. (2023). *Location and Strategies in Stackelberg Security Games with Risk Aversion*. Springer.
- Cicala L., Gargiulo F., Parrilli S., Amitrano D., y Pigliasco G. (2024). Progressive monitoring of

micro-dumps using remote sensing: An applicative framework for illegal waste management. *Sustainability*.

Corporación Ciudades (2022). Estudio de Residuos y Reciclaje.

Corporación Ciudades (2024). Estudio de Reciclaje y Residuos en Grandes Ciudades de Chile.

Decreto de Ley N° 189 (2008). Diario Oficial de la República de Chile. Santiago de Chile.

Gibbons R. (1992). *Game Theory for Applied Economists*. Princeton University Press, Princeton, New Jersey.

Ginga C. P., Ongpeng J. M. C., y Daly M. K. M. (2020). Circular economy on construction and demolition waste: A literature review on material recovery and production. *Materials*, 13(13).

Han Y., Zheng H., Huang Y., y Li X. (2022). Considering consumers' green preferences and government subsidies in the decision making of the construction and demolition waste recycling supply chain: A stackelberg game approach. *Buildings*, 12(6).

Hohl B. C., Kondo M. C., Rupp L. A., Sadler R. C., Gong C. H., Le K., Hertlein M., Kelly C., y Zimmerman M. A. (2023). Community identified characteristics related to illegal dumping; a mixed methods study to inform prevention. *Journal of Environmental Management*, 346.

Ilustre Municipalidad de Valparaíso (2024). Se han retirado 200 toneladas de voluminosos de los cerros.

Instituto Nacional de Estadísticas (2019). Actualización 2019 del SIEDU.

Jiang P., Fan Y. V., Zhou J., Zheng M., Liu X., y Klemeš J. J. (2020). Data-driven analytical framework for waste-dumping behaviour analysis to facilitate policy regulations. *Waste Management*, 103:285–295.

Ley N° 20879 (2015). Diario Oficial de la República de Chile. Santiago de Chile.

Liu C., Hua C., y Chen J. (2022). Efficient supervision strategy for illegal dumping of construction and demolition waste: A networked game theory decision-making model. *Waste Management & Research*, 40(6):754–764. PMID: 34407708.

Liu J., Liu Y., y Wang X. (2019). An environmental assessment model of construction and demolition waste based on system dynamics: a case study in guangzhou. *Environmental Science and Pollution Research*, 27:37237 – 37259.

Liu Y., Hao J., Li C., Li Y., Zhou C., Zheng H., Xu S., Chen W., y Li X. (2023). How can construction and demolition waste recycling public–private partnership projects performance compensate during the operation period? a two-stage perspective of recycling and remanufacturing. *Systems*, 11(4).

Menegaki M. y Damigos D. (2018). A review on current situation and challenges of construction and demolition waste management. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*.

Mercader-Moyano P., Camporeale P., y López-López J. (2021). A construction and demolition waste management model applied to social housing to trigger post-pandemic economic recovery in mexico. *Waste Management Research*, 40:1027 – 1038.

Ministerio del Medio Ambiente (2023). Reporte del Estado del Medio Ambiente. Capítulo C. Residuos.

Molla A. S., Tang W., Sher W., Bahar M. M., y Bekele D. N. (2025). The effects of construction and demolition waste (c&dw) fine residues on landfill environments: A column leaching experiment. *Toxics*, 13(5).

Ngalo N. y Thondhlana G. (2023). Illegal solid-waste dumping in a low-income neighbourhood in south africa: Prevalence and perceptions. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(18).

Nguyen L. H., Tran T. V. N., Hoang M. G., Nguyen H. G., Tong T. K., Isobe Y., Kawasaki M., Ishigaki T., y Kawamoto K. (2023). Material and monetary flows of construction and demolition waste and assessment on physical and environmental properties of illegally dumped construction and demolition waste in hanoi. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(60):125965–125976.

Ossio F. y Faúndez J. (2021). Diagnóstico Nacional de Sitios de Disposición Ilegal de Residuos.

Ossio F., Molina-Ramírez J., Larrain H., y Schmitt C. (2020). *CAPÍTULO IX Políticas municipales estandarizadas para el manejo sustentable de residuos de construcción y demolición*, pp. 289–317.

Oyarce J. (2022). Microbasurales e incendios Forestales en la Comuna de Valparaíso: Análisis y Propuestas de Gestión. Manual Técnico N°28.

Ramos M., Martinho G., Vasconcelos L. T., y Ferreira F. (2023). Local scale dynamics to promote the sustainable management of construction and demolition waste. *Resources, Conservation Recycling Advances*.

- Rodríguez G. (2021). Estudio de disposición a pagar para un manejo sustentable de residuos de construcción y demolición en Chile. *Santiago-Chile: FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL INDUSTRIAL.*
- Rondinel-Oviedo D. (2021). Construction and demolition waste management in developing countries: a diagnosis from 265 construction sites in the Lima metropolitan area. *International Journal of Construction Management*, 23:371 – 382.
- Seror N. y Portnov B. (2019). Estimating the effectiveness of different environmental law enforcement policies on illegal CD waste dumping in Israel. *Waste management*, 102:241–248.
- Seror N. y Portnov B. A. (2018). Identifying areas under potential risk of illegal construction and demolition waste dumping using GIS tools. *Waste Management*, 75:22–29.
- Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo (2018). Diagnóstico por comuna y por región en materia de RSD y asimilables.
- Sun H., Liu H., Tian J., Guo R., Yao L., Hong W., Li H., y Zhu C. (2022). Modelling and optimizing resource management and environmental benefit of construction and demolition waste: A case study in China. *Buildings*.
- Vivanco E. (2021). Gestión de residuos sólidos urbanos en microbasurales. Casos de Chile, Argentina, Colombia, Perú y España. Asesoría Técnica Parlamentaria.
- Wang H. y Yi W. (2023). A Stackelberg game model for construction waste transportation. *Advanced Engineering Informatics*, 56:101991.

Yao J., Yi W., Wang H., Zhen L., y Liu Y. (2022). Stackelberg game model for construction waste disposal network design. *Automation in Construction*, 144:104573.

Zhang H., Chen W., Peng J., Wang Y., Zeng L., Gao P., Zhu X., y Li X. (2024). Pricing decisions in construction and demolition waste recycling supply chains under carbon tax scenarios. *Systems*, 12(1).